



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

PAINELAITTEIDEN KOE- PONNISTUKSISSA KÄYTET- TÄVÄT PAINEET JA APU- OSAT

Sumitomo SHI FW

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Toni Jalo			
Työn nimi Painelaitteiden koeponnistuksissa käytettävät paineet ja apuosat			
Päiväys	1.6.2018	Sivumäärä/Liitteet	49/0
Ohjaajat Tutkimusinsinööri Jussi Asikainen, TKI-asiantuntija Jenni Toivanen, Chief Engineer Heikki Holopainen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Sumitomo SHI FW			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työn tarkoituksena oli kerätä yhteen Sumitomo SHI FW:n tekemät linjaukset koepaineiden määrittämisestä ja koeponnistuksissa käytettävien apuosien mitoituksessa. Työn tavoite oli käsitellä koepaineiden määrittämistä vesiputkikattiloiden ja yrityksen asennussuunnittelijoiden näkökulmasta. Koepaineiden määrittäminen käsitellään EN- sekä ASME-standardien osalta. Työssä oli myös tavoitteena käsitellä tapaus, jossa sovelletaan samaan aikaan EN- sekä ASME-standardia. Koeponnistuksien apuosilla tarkoitetaan tässä työssä koeponnistuspäätyjä sekä niihin hitsattavia yhteitä. Tavoitteena on käyttää yhtä päätytyyppiä koeponnistuskokonaisuuksissa sekä lopputuotteissa. Työn tavoitteena oli esittää syitä yhden päätytyypin suosimiselle ja kuinka pääty suunnitellaan painekoetta varten.</p> <p>Työssä käytiin läpi aiheen käsittelyhistoriaa palaverimuistiodien avulla sekä tutustumalla aihetta käsitteleviin standardeihin. Työssä tutkittiin eurooppalaisten standardien SFS-EN 13480-5:2017 ja SFS-EN 12952-3:2012 koepaineiden laskentakaavoissa esiintyviä eroja. ASME-standardit eivät sisältäneet samanlaisia eroavaisuuksia, joten samanlaista standardien vertailua ei ollut tarvetta tehdä. Koeponnistuspäätyjen mitoittamiseen löytyi tieto yrityksen materiaaleista ja standardeista. Yrityksen materiaaleista löytyi myös tietoa, miksi yhtä päätytyyppiä tulisi suosia.</p> <p>Projektin lopputuloksena saatiin selkeytettyä vesiputkikattiloiden painekokeiden koepaineiden laskentaan sekä niiden valitsemisesta. Standardien koepaineiden laskentakaavoissa havaittujen erojen perusteella tavoite on tulevaisuudessa käyttää CE-merkittävien vesiputkikattiloiden koeponnistuksissa standardin SFS-EN 12952-3:2012 mukaisia koepaineita. Yhdenmukaisella koepaineen laskentatavalla vältetään epämääräisiltä koepaineilta. Puhtaissa ASME-standardin mukaan suunniteltavissa vesiputkikattiloissa käytetään ASME-standardin mukaisia koepaineen arvoja. Työssä saatiin perusteet yhden päätytyypin käyttöön ja kuinka apuosat tulisi suunnitella. Yhden päätytyypin käyttäminen helpottaa suunnittelijan tehtäviä. Työssä käsitelty päätytyyppi on myös lujuusteknillisesti parempi vaihtoehto muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Lopputulosten perusteella koepaineiden laskenta sekä valitseminen tulee olemaan tulevaisuuden projekteissa paljon selkeämpää.</p>			
Avainsanat paine-ko, koepaine, apuosa, suora pääty, koeponnistuspääty, koeponnistus			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author Toni Jalo			
Title of Thesis Test Pressures and Auxiliary Parts of Pressure Vessels			
Date	1.6.2018	Pages/Appendices	49/0
Supervisors Mr. Jussi Asikainen, Research Engineer, Ms. Jenni Toivanen, RDI Specialist & M. Sc. Heikki Holopainen			
Client Organisation /Partners Sumitomo SHI FW			
<p>Abstract</p> <p>The subject of this thesis was to gather Sumitomo SHI FW's alignments of the pressure vessel's test pressures and the design rules for the auxiliary parts for pressure tests. The main purpose was to study test pressures in a water tube boiler and also from the company's construction planning engineer's perspective. The test pressures were presented by EN and ASME standards. This work focused on to present pure EN and ASME standard cases and an example of the situation where both the EN and ASME standards are applied at the same time. The auxiliary parts in this work include pressure test ends and assemblies welded on nozzles. The company's target is to use one type of a head in pressure tests and final products. The aim of this work was to find reasons to use that one type of head and how it should be designed for test conditions.</p> <p>The work started by going through the old memos and standards where the pressure test topics were discussed. The european standards SFS-EN 13480-5:2017 and SFS-EN 12952-3:2012 have different equations for test pressure calculation which were compared together. In the ASME standards test pressure calculation were much simpler and it didn't need comparison between standards. The design rules for pressure test ends were found from a company's memos and standards. Reasons to use one type of head were also found from company's material.</p> <p>As a result of the project it was clarified how to calculate and define the test pressures for a water tube boiler pressure tests. The comparison between european water tube boiler standard and the metallic industrial piping standard revealed difference in the test pressure equations. From now on, the goal is to use only the standard SFS-EN 12952-3:2012 test pressure equations to avoid unexpected test pressures in CE-markable water tube boilers. In pure ASME standard situation, the test pressure will be calculated by ASME standard. The way to design the pressure test ends and reasons to use one type of a head were found. Using one type of a head in pressure tests and final product makes designing work easier. The type of a head used is also better in strength of material perspective compared to another head options. As a conclusion calculation of the test pressures and the rules for pressure test end design will be clearer in the future.</p>			
<p>Keywords</p> <p>pressure test, test pressure, auxiliary part, flat end, pressure test end</p>			

ESIPUHE

Haluaisin kiittää Sumitomo SHI FW:tä ja erityisesti Chief Engineer Heikki Holopaista mielenkiintoisesta ja opettavaisesta opinnäytetyön aiheesta sekä siitä valtavasta panostuksesta työnohjaukseen. Opinnäytetyön ohjauksesta suuret kiitokset myös tutkimusinsinööri Jussi Asikaiselle sekä TKI-asiantuntija Jenni Toivaselle. Kiitoksia myös sukulaisille sekä kavereille, jotka ovat tukeneet opintojen aikana.

Varkaudessa 1.6.2018

Toni Jalo

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
1.1	Työn tausta	8
1.2	Tavoite ja rajaus	8
1.3	Sumitomo SHI FW	9
2	PAINELAITE- JA KATTILASTANDARDIT	10
2.1	Yleistä	10
2.2	Koeponnistus	11
3	KOEPONNISTUSPAINEEN MÄÄRITTELEMINEN	12
3.1	Sidosryhmien tehtävät	12
3.2	Suunnittelujännitys koeolosuhteissa	13
3.3	Vaadittu koepaine	15
3.3.1	Nestepainekoe	15
3.3.2	Kaasupainekoe	18
3.4	Suurin sallittu koepaine	19
3.5	Hydrostaattinen paine koepaineessa	21
3.6	Koepaineen määrittäminen	22
3.7	Neste/kaasupainekokeen korvaaminen	24
3.8	Painekokeen suoritus	24
4	KOEPONNISTUKSEN APUOSAT	26
4.1	Eri päätytyypeistä	27
4.2	Lamellirepeily	28
4.3	Päittäishitsattu suora pääty	31
4.4	Päädyn mitoitus	34
4.5	Runkokappaleen vaadittu seinämänpaksuus	38
4.6	Yhteen vaadittu seinämänpaksuus	41
4.7	Suunnittelujännitys apuosille	42
5	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	44
6	YHTEENVETO	46
7	LÄHTEET	48

KÄSITTEET

G_1	Muotokerroin päädyille tai levyille
G_2	Muotokerroin suorakaiteen ja ellipsin muotoisille levyille
G_3	Muotokerroin suorille päädyille, joissa on aukko
c_{avg}	Valmistuksen alitoleranssi (mm)
c_{2i}	Sisäpuolinen kulumisvara (mm)
c_{2fg}	Savukaasupintojen kulumisvara. (mm)
d_i	Sisähalkaisija (mm)
d_{ia}	Sisähalkaisija ilman lisiä (mm)
$d_{ia,pi}$	Putken sisähalkaisija ilman lisiä (mm)
$d_{ia,no}$	Yhteen sisähalkaisija ilman lisiä (mm)
d_{iavg}	Keskimääräinen sisähalkaisija sisältäen alitoleranssin (mm)
$d_{iavg,no}$	Yhteen keskimääräinen sisähalkaisija sisältäen valmistuksen alitoleranssin (mm)
$d_{on,pi}$	Putken nimellinen ulkohalkaisija (mm)
$d_{on,no}$	Yhteen nimellinen ulkohalkaisija (mm)
$d_{on,h}$	Päädyn nimellinen ulkohalkaisija (mm)
d_{oa}	Ulkohalkaisija ilman lisiä (mm)
f_{test}	Suunnittelujännitys koeolosuhteissa (MPa)
f_{allo}	Suunnittelujännitys (MPa)
$f_{allo,h}$	Päädyn suunnittelujännitys (MPa)
$f_{allo,no}$	Yhteen suunnittelujännitys (MPa)
$f_{allo,nc}$	Suunnittelujännitys ajasta riippumattomilla arvoilla lämpötilassa t (MPa)
$f_{allo,20}$	Suunnittelujännitys lämpötilassa 20 °C (MPa)
e_s	Runkokappaleen todellinen seinämänpaksuus ilman lisiä (mm)
$e_{a,no}$	Yhteen todellinen paksuus ilman lisiä (mm)
e_{cso}	Runkokappaleen vaadittu seinämänpaksuus ilman lisiä, kun $v=1$ (mm)
$e_{c,no}$	Yhteen vaadittu seinämänpaksuus (mm)
e_{ch}	Suoran päädyn vaadittu seinämänpaksuus ilman lisiä (mm)
e_{ch1}	Suoran päädyn uran pohjalla vaadittu seinämänpaksuus ilman lisiä (mm)
e_{h1}	Suoran päädyn todellinen paksuus uran pohjalla (mm)
e_{th}	Suoran päädyn todellinen seinämänpaksuus ilman lisiä (mm)
e_{h1}	Todellinen seinämänpaksuus ilman valmistuksen alitoleranssia (mm)
e_{avg}	Keskimääräinen seinämänpaksuus (mm)
h_{comp}	Komponentin korko
h_{gauge}	Mittarin korko
p_c	Laskentapaine (bar)
p_i	Tarkastuspaine (bar)
$p_{test,req}$	Komponenttikohtainen vaadittu koepaine (bar)
$p_{test,allo}$	Komponenttikohtainen suurin sallittu koeponnistuspaine (bar)
p_{test}	Valittu painekokeen arvo (bar)
p_{hydr}	Hydrostaattinen paine (bar)

$p_{hydr.comp}$	Komponenttikohtainen hydrostaattinen paine (bar)
$p_{test.gauge}$	Koepaine hydrostaattinen paine huomioituna
r_k	Kevennysuran sisäsäde suorissa päädyissä (mm)
$R_m 20$	Materiaalin murtolujuus lämpötilassa 20 °C (MPa)
$R_{eH} 20$	Materiaalin ylempi myötöraja laskentalämpötilassa (MPa)
t	Lämpötila (°C)
t_R	Edustava materiaalin paksuus (mm)
$R_{p0,2} t$	Materiaalin 0,2 % venymäraja lämpötilassa t (MPa)
$R_{p0,2} 20$	Materiaalin 0,2 % venymäraja lämpötilassa 20 °C (MPa)
$R_{p1,0} 20$	Materiaalin 1,0 % venymäraja 20 °C lämpötilassa (MPa)
S_{test}	Varmuuskerroin koepaineessa
σ_φ	Kehän suuntainen kalvojäännitys (MPa)
ν	Lujuuskerroin
ρ	Väliaineen tiheys

LYHENTEET

CFB	Circulized Fluidized Bed
NDT	Non-destructive testing
MAWS	Maximum Allowable Working Stress
PED	Painelaitedirektiivi
EN	European Standard
EU	Euroopan unioni
EFTA	European Free Trade Association
ETA	Euroopan talousalue
ASME	American Society of Mechanical Engineers
RT	Radiografinen tarkastus
UT	Ultraäänitarkastus
PT	Tunkeumanestetarkastus
MT	Magneettijauhetarkastus
DData	Design data
WHB	Waste Heat Boiler

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Tämän opinnäytetyö toteutettiin toimeksiantajan Sumitomo SHI FW tiloissa Varkaudessa. Työ toteutettiin Structural Engineering osastolle, joka osallistuu yhteistyössä yrityksen muiden osastojen kanssa koeponnistuspaineiden määrittämiseen sekä apuosien mitoittamiseen. Aihetta on käsitelty aiemmin eri projektien aikana, mutta nyt aihetta haluttiin käsitellä yleisellä tasolla helpottamaan tulevien projektien koeponnistuksia.

Voimalaitoskattiloiden lopputarkastukseen kuuluvien koeponnistuksien koepaineiden määrittämisessä on esiintynyt tulkintaeroja eri sidosryhmien välillä. Epäselvyyksiä koepaineiden määrittämiseen ovat aiheuttaneet standardeista tehdyt tulkinnat tai standardeissa esiintyneet virheet. Yrityksen sisällä on tehty vuosien aikana tulkinnat koepaineiden määrittämisestä sekä standardeihin on saatu korjauksia. Tulkintoja ei ole kerätty yhteen pakettiin missään vaiheessa, joka on johtanut epäselvyyksiin koepaineiden määrittämisessä. Standardien virheitä on saatu poistettua vuosien aikana, joka myös on lisännyt epäselvyyksiä sidosryhmien välillä.

1.2 Tavoite ja raja

Työn tavoitteena on selkeyttää koepaineiden laskentaa puhtaissa Painelaitedirektiivin 2014/68/EU sekä ASME-standardien mukaisesti suunniteltavien voimalaitoskattiloiden tapauksissa. Selkeyttämisen vuoksi painelaitedirektiivistä käytetään tässä työssä jatkossa lyhennettä PED. Tavoitteena on myös selkeyttää tilannetta, kun täytetään PEDin sekä ASME-standardien vaatimuksia. Koeponnistusasioita on tarkoitus käsitellä kattila-alueen näkökulmasta eli ainoastaan siltä osin, kun aihe liittyy yrityksen asennussuunnittelijoiden laatimaan painekoesuunnitelmaan.

Painekokeen suoritusta käsitellään yleisellä tasolla. Työn on tarkoitus toimia ohjeena koepaineen määrittämisessä ja apuosien mitoittamisessa. Apuosien mitoituksessa käydään läpi, kuinka pääty mitoitetaan soveltaen standardia yrityksen linjausten mukaisesti. Apuosien mitoituksen osalta käydään läpi koeponnistuspäätyjen sekä niihin hitsattavien yhteiden mitoittaminen. Koeponnistuspäätytyypinä halutaan käyttää yhtä tiettyä päätytyyppiä, jota käytettäisiin PEDin sekä ASME-standardien mukaisesti suunniteltavien kattiloiden koeponnistuksissa sekä lopputuotteena. Työn tavoitteena on käsitellä perusteita, miksi yhtä päätytyyppiä tulisi suosia.

Työhön kuuluu myös eri sidosryhmien haastattelut, joiden tarkoitus on selvittää kunkin sidosryhmän tehtävät ja vastuut koeponnistuspaineiden määrittämisessä. Sidosryhmien tehtäviä käsitellään tässä työssä siltä osin, kun se on tarpeen ja siitä on hyötyä tulevaisuudessa. Haastattelut antavat myös kuvan sen hetkisestä tilanteesta ja ongelmakohtista koeponnistuspaineiden määrittämisprosessissa.

1.3 Sumitomo SHI FW

Sumitomo SHI FW on energiateknologia-yhtiö, joka on osa maailmanlaajuisesta Sumitomo Heavy Industries Ltd. -yhtiöstä. Yrityksen päätuote on kiertopetiteknologialla varustettujen voimalaitoskattiloiden suunnittelu ja toimittaminen. Uusien voimalaitoskattiloiden suunnittelemisen ja toimittamisen lisäksi Sumitomo SHI FW huoltaa käytössä olevia voimalaitoskattiloita. Suomen toimipisteet sijaitsevat Varkaudessa ja Espoossa, joissa työskentelee yhteensä yli 400 henkilöä. Varkaudessa työskentelee suurin osa työntekijöistä suunnittelun, huollon ja projektitoimitusten tehtävissä. Sumitomo SHI FW syntyi, kun Sumitomo Heavy Industries Ltd yhtiö osti 2017 Amec Foster Wheelerin CFB voimalaitoskattilaliiketoiminnan tullen uudeksi johtajaksi kestävien energiaratkaisujen toimittajana. Sumitomo SHI FW -yhtiön osuus maailmanlaajuisesti toimitetuista CFB-kattiloista on lähes 50 %.

(Sumitomo SHI FW 2017.)

2 PAINELAITE- JA KATTILASTANDARDIT

Painelaitteiden suunnitteluun on eri tuotestandardeja. Standardeja sovelletaan keskenään, jos todetaan toisessa jonkin asian olevan paremmin. Yhdenmukaistetut painelaitestandardit pohjautuvat painelaitedirektiivistä tehtäviin tulkintoihin, joten koepaineiden laskennan tulisi olla samanlainen jokaisessa standardissa. Tässä kappaleessa kerrotaan yleisesti vesiputkikattiloiden suunnittelustandardeista sekä painekokeesta.

2.1 Yleistä

Euroopan unionin alueella uusien painelaitteiden markkinoille tuontiin noudatetaan painelaitedirektiiviä 2014/68/EU. Painelaitedirektiiviä noudatetaan kaikissa EU, ETA, EFTA ja niissä maissa, joissa se on viety osittain tai kokonaan omaan lainsäädäntöön. Painelaitteet joiden suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 bar kuuluvat painelaitedirektiivin piiriin. PEDin lisäksi painelaitteiden suunnitteluun käytetään yhdenmukaistettuja standardeja. (Painelaitedirektiivi 2014/68/EU 2014.) Vesiputkikattiloiden suunnitteluun sovelletaan seuraavia EN- sekä ASME-standardeja:

- SFS-EN 13480 Metalliset teollisuusputkistot
- SFS-EN 12952 Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot
- SFS-EN 13445 Lämmittämättömät painesäiliöt
- ASME Section 1 Rules for Construction of Power Boilers
- ASME B31.1 Power piping, Code for Pressure piping
- ASME Section 8 Rules for Construction of Pressure Vessels.

Näiden standardien lisäksi tulee noudattaa muitakin normeja, mutta tässä ovat listattuna tämän työn kannalta merkittävimmät standardit. Edellä mainituista standardeista tullaan tässä työssä käyttämään nimityksiä kattilastandardi, putkistostandardi sekä säiliöstandardi. Säiliöt sekä lieriöt tulevat CE-merkittyinä yrityksen toimituskokonaisuuksiin. Näin ollen säiliöstandardeja käsitellään tässä työssä ainoastaan siltä osin, kuin on tarpeen. Työssä ei otettu kantaa säiliöiden tai lieriöiden koeponnistuksiin. Säiliöiden ja lieriöiden koeponnistus on siis laitetoimittajan vastuulla. Säiliöt sekä lieriöt ovat kuitenkin osa kattilalaitoksen koeponnistuskokonaisuuksia, jolloin säiliöiden sekä lieriöiden toimittajan tulisi toimittaa suurimmat sallitut koeponnistuspaineet. (Kortelainen 2018)

2.2 Koeponnistus

Painelaitteiden koeponnistus on osa painelaitedirektiivin vaatimaa laitekokonaisuuden lopputarkastusta, joka suoritetaan valvotuissa olosuhteissa. Paineenalaisille osille tehdään tarvittavat tarkastukset tarkastuspaineessa painekokeen jälkeen. (SFS-EN 13480-5:2017.) Standardin SFS-EN 12952-3:2012 mukaan painekokeen on tarkoitus osoittaa valmiin tuotteen eheys sekä lujuus. Todellisuudessa koepaine ei riitä lujuuden todentamiseen, koska koepaine määritetään koeponnistuskokonaisuuden heikoimman lenkin mukaan. Eli jokin koeponnistuskokonaisuuden komponentti rajoittaa muiden komponenttien koepainetta. Käytännössä painekoe tuo esiin ainoastaan materiaali- sekä valmistusvirheitä. Kokeen avulla ei voida todentaa myöskään pitkäaikaislujuutta. Materiaalin ominaisuudet heikkenevät käyttölämpötilojen ollessa virumisalueella, jolloin todelliset käyttöolosuhteet ja koeolosuhteet eroavat merkittävästi. Painekoe suoritetaan huonelämpötilassa. (SFS-EN 13480-5:2017.)

Koeponnistukset jaetaan eri luokkiin. Luokat jaetaan kokeen tarkoituksen mukaan. Markkinoille saatetun laitteen painekokeessa koeponnistuspaine määräytyy kansallisten määräysten mukaan. Suomessa määräaikaisen painekokeen koepaine määräytyy Valtioneuvoston asetuksen 1549/2016 pykälän 11 § mukaan. Painekoe suoritetaan määräaikaistarkastuksen tai korjauksen vuoksi. (Valtioneuvoston asetus painelaiteturvallisuudesta. L 1549/2016, 2018)

Rakenteilla olevan laitteen painekokeessa noudatetaan painelaitedirektiivin tai ASME-standardin mukaisia vaatimuksia. Poikkeusmenettelynä rakenteilla olevalle laitteelle voidaan toteuttaa tiiveyskoe, jolloin koepaineena käytetään suurinta sallittua käyttöpainetta. Tällaisen poikkeusmenettelyn tavoite on välttää täysimittainen painekoe, jos koeponnistuskokonaisuus sisältää herkkiä apujärjestelmiä. Täysimittainen painekoe tulisi suorittaa, jos rakenteeseen tehdään tiiveyteen vaikuttavia korjauksia. Jos täysimittaisessa painekokeessa havaitaan vuoto, korjaustoimenpiteiden jälkeen tehdään uusi painekoe. Vuodon ollessa pieni ei välttämättä tarvitse tehdä painekoetta uudelleen, vaan vuoto kohta tarkistetaan NDT-menetelmillä korjaustoimenpiteiden jälkeen. NDT-tarkastuksesta sovitaan aina tapauskohtaisesti (Kortelainen 2018).

Pääsääntöisesti painekoe suoritetaan nestepainekokeena, mutta tilanteen vaatiessa voidaan suorittaa korvaavia kokeita. Korvaaviin kokeisiin lukeutuu kaasupainekoe sekä NDT-tarkastukset. Vesipainekoe voidaan korvata kaasupainekokeella, jos mahdolliset vesijäänteet ovat haitallisia prosessille tai laitteiston muut vaatimukset eivät salli vesijäänteitä mahdollisen korroosion vuoksi. Koska kokoonpuristuvan väliaineen käyttöön painekokeessa liittyy vaaratekijöitä, tulee kokeeseen varautua riittävillä turvallisuustoimenpiteillä. Neste- sekä kaasupainekokeen ollessa haitallinen rakenteiden yksittäisille hitseille, voidaan painekokeet korvata 100 % UT/RT ja 100 % PT/MT tarkastuksilla. (SFS-EN 13480-5:2017.)

3 KOEPONNISTUSPAINEEN MÄÄRITTELEMINEN

Koeponnistuspaineen valinnassa otetaan huomioon testattavan alueen jokainen komponentti. Koepaine lasketaan putkille, yhteille sekä päädyille. Koeponnistettavaan kokonaisuuteen kuuluu putkien, yhteiden sekä päätyjen lisäksi venttiileitä sekä muita laitteita. Laitteiden sekä venttiilien toimittajien tulisi ilmoittaa tuotteilleen suurimmat sallitut koeponnistuspaineet, jotta asennussuunnittelija voisi luotettavasti valita koeponnistuskokonaisuuteen koepaineen.

Koeponnistuspaine lasketaan painelaitedirektiivin 2014/68/EU tai ASME-standardien mukaisesti. CE-merkin saavuttamiseksi noudatetaan painelaitedirektiivin mukaisia painekoevaatimuksia. PEDiä tulee noudattaa kaikissa EU, EFTA, ETA sekä niissä maissa, joissa painelaitedirektiivi on määritetty toimitusmaan lakiasetuksissa (Kortelainen 2018). Koepaineiden laskenta suoritetaan siis PED/EN-kaavoilla, vaikka kattilalaitoksen suunnitteluun käytettäisiin muuten ASME-standardeja. Tässä kappaleessa käydään läpi eri sidosryhmät tehtävineen, koepaineen laskentaa, koepaineen määrittämistä sekä hieman painekokeen suorituksesta.

3.1 Sidoryhmien tehtävät

Koeponnistusasiat koskettavat eri sidosryhmiä eri lailla ja jokaisella on tietyt vastuut. Tässä kappaleessa käydään läpi eri sidosryhmät sekä heidän tehtävänsä ja mitä dokumentteja he tuottavat koeponnistussuunnitelmaa varten.

Standard and Directive Engineer/Lead Engineer, Conformity Assessment & PP Expediting

- Koeponnistusasioiden hallinnointi
- CE-merkittävien laitekokonaisuuksien määrittäminen
- Koeponnistussuunnitelman tarkastus

Standard and Directive Engineering/Lead Engineer, Conformity Assessment & PP Expediting tehtäviin kuuluu koeponnistusasioiden yleinen hallinnointi. Tehtäviin kuuluu myös CE-merkittävien koeponnistuskokonaisuuksien määrittäminen sekä asennussuunnittelijan tekemän koeponnistussuunnitelman tarkastaminen. (Kortelainen, Koeponnistusasioiden haastattelu 2018)

Boiler Structural Engineering

- Boiler Tubes and Pipes Specification
- Header Ends DData
- Pressure Test End DData

Boiler Structural Engineering -osasto tuottaa koeponnistussuunnitelmaa varten dokumentit "Boiler Tubes and Pipes Specification DData" sekä "Header Ends DData" eli putkien, kammioden sekä kammioden päätyjen suunnittelutiedot. Koeponnistuksia varten Structural Engineering laskee koeponnistuspäädyn ja tuottaa dokumentin "Pressure Test End DData". Osasto vastaa myös koeponnistuspaineiden laskentaan liittyviin kysymyksiin.

Systems Engineering

- Boiler small bore and auxiliary piping

Systems Engineering -osastolle kuuluu venttiilien ja laitteiden suunnittelu. Venttiilien ja laitteiden toimittajien tulee ilmoittaa komponenttien suurimmat sallitut koeponnistuspaineet Systems Engineeringin tuottamiin dokumentteihin, joista ne ovat kätevästi asennussuunnittelijoiden saatavissa.

Construction Planning Engineer

- Valitsee koeponnistuskokonaisuuden koepaineen
- Pressure Test Plan
- Koeponnistuspaine ja tulpattavan putken tiedot koeponnistuspäädyn laskentaa varten

Asennussuunnittelijan tehtäviin kuuluu koeponnistuspaineen määrittäminen koeponnistuskokonaisuudelle. Asennussuunnittelijan tehtäviin kuuluu myös määrittää tulpattavat putket, joihin Boiler Structural Engineering laskee koeponnistuspäädyn ja tuottaa todokementin Pressure Test End DDatan. Koeponnistuspäädyn laskentaa varten tulee ilmoittaa tulpattavan putken tiedot sekä koeponnistuspaine, joka on määritetty tulpattavalle alueelle.

Yksi painekoeasioihin liittyvä sidosryhmä on tarkastuslaitos. Tarkastuslaitoksen tehtäviin kuuluu uusien sekä käytönaikaisten laitteiden ja laitteistojen arviointitehtävät. Tehtäviin kuuluu toimia kolmantena osapuolena projektissa ja verrata suunnitteluaineistoa PEDiin. (Turvallisuus ja kemikaalivirasto 2016.)

3.2 Suunnittelujännitys koeolosuhteissa

Koeolosuhteen suunnittelujännityksen f_{test} arvoja käytetään suurimman sallitun koepaineen ja tulpattavan putken vaaditun seinämän laskennassa. Vaaditun putken seinämän laskemisella ei mitoiteta putkea eikä painekokeen tarkoitus ole mitoittaa komponentteja. Koetilanteen vaadittua seinämää tarvitaan koeponnistuspäädyn seinämänpaksuuden laskennassa, koska päädyn mitoittamisessa tulee käyttää koetilanteen suunnitteluarvoja. Putken mitoittaminen on tehty ennen koeponnistuspäädyn laskentaa eikä sitä käsitellä tässä työssä.

Putken materiaalin ollessa ferriittistä tai austeniittistä ja vähimmäismurtovenymän ollessa alle 30 %, lasketaan suunnittelujännitys koeolosuhteissa f_{test} kaavalla (SFS-EN 12952-3:2012):

$$f_{\text{test}} = \frac{R_{p0,2\ 20}}{1,05}, \quad (1)$$

missä $R_{p0,2\ t}$ on materiaalin 0,2 % venymäraja 20 °C lämpötilassa.

Varmuuskertoimen arvona käytetään 1,05, joka on sama ferriittisille sekä austeniittisille teräksille (SFS-EN 12952-3:2012).

Käytettäessä austeniittisiä teräksiä, joiden vähimmäismurtovenymä on $\geq 30\ %$ mutta $< 35\ %$, lasketaan suunnittelujännitys koepaineelle f_{test} kaavalla (SFS-EN 12952-3:2012):

$$f_{\text{test}} = \frac{R_{p1,0\ 20}}{1,05}, \quad (2)$$

missä $R_{p1,0\ t}$ on materiaalin 1,0 % venymäraja 20 °C lämpötilassa.

Standardi SFS-EN 12952-3:2012 ei sisällä suunnittelujännityksen arvoja koetilanteessa, jos käytetään austeniittisiä teräksiä, joiden vähimmäismurtovenymä on $\geq 35\ %$. Säiliöstandardi SFS-EN 13445-3:2014 ottaa huomioon myös tämän vaihtoehdon, joten suunnittelujännitys koetilanteeseen lasketaan sen mukaan. Koetilanteen suunnittelujännitys f_{test} on suurin arvoista:

$$f_{\text{test}} = \max\left\{\frac{R_{m\ 20}}{2}; \frac{R_{p1,0\ t}}{1,05}\right\}. \quad (3)$$

missä $R_{m\ 20}$ on materiaalin murtoraja 20 °C lämpötilassa.

Putkistostandardissa EN 13480-3:2017 koeolosuhteiden suunnittelujännitys on erilainen austeniittisille vähimmäismurtovenymän ollessa $\geq 35\ %$. Suunnittelujännitys tämän standardin mukaan on suurin arvoista:

$$f_{\text{test}} = \max\left\{0,45R_{m\ 20}; \frac{R_{p1,0\ 20}}{1,05}\right\}, \quad (4)$$

missä $R_{m\ 20}$ on materiaalin murtoraja 20 °C lämpötilassa.

Standardi ASME Section 1 rajoittaa painekokeen aikaiset jännitykset 90 % myötörajaan. Näin ollen ASME-standardia noudatettaessa suunnittelujännitys koeolosuhteissa f_{test} lasketaan kaavalla:

$$f_{\text{test}} = \frac{R_{p0,2\ 20}}{1} = 0,9R_{p0,2\ 20} \quad (5)$$

3.3 Vaadittu koepaine

Kattila, säiliö tai putkisto koostuu erillisistä tiloista sekä osista, joilla on oma laskentapaineensa sekä laskentalämpötilansa. Jokaiselle osalle ja tilalle suoritetaan yksittäisiä laskentoja, jolla määritetään vaadittu komponenttikohtainen koepaine $p_{\text{test.req}}$. Harmonisoitujen standardien kuten SFS-EN 12952-3:2012 mukaisen vaaditun koepaineen laskentakaavat pohjautuvat painelaitedirektiivistä tehtyihin tulkintoihin. (SFS-EN 12952-3:2012.)

3.3.1 Nestepainekoe

Painelaitedirektiivissä vaaditaan nestepainekokeen koepaineen olevan vähintään 1,43 kertaa käyttö- paine tai suurinta kuormitusta vastaa paine, joka laitteeseen voi kohdistua eliniän aikana lämpötila huomioon ottaen. Paineekokeella yritetään saada mahdollisimman lähelle käytön aikaisia rasituksia vastaavat olosuhteet.

Standardien välillä on selkeästi havaittavissa tulkintaeroja. Kattilastandardissa käytetään ainoastaan 0,2 % ja 1,0 % venymärajojen suhdetta vaaditun koepaineen laskennassa, mutta putkisto- ja säiliöstandardissa ajasta riippumattomia suunnittelujännityksiä, joihin sisältyy myötö- sekä murtolujuus. Myötölujuudelle sekä murtolujuudelle sovelletaan eri varmuuskertoimia, jotka ovat standardeissa määritetty. Tietyllä materiaalin ja lämpötilan yhdistelmällä putkisto- ja säiliöstandardin mukaisessa vaaditun koepaineen laskennassa osoittajan paikalle voi tulla murtolujuus, jolloin vaaditun koeponnistuspaineen arvoissa tulee eroavaisuuksia.

Kattilastandardissa SFS-EN 12952-3 vaadittu koepaine $p_{\text{test.req}}$ lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$p_{\text{test.req}} = \max \left\{ 1,43p_d; 1,25p_d \frac{R_{p0,2\ 20}}{R_{p0,2\ t}} \right\}, \quad (6)$$

missä $R_{p0,2\ 20}$ = Materiaalin 0,2 % venymäraja 20 °C lämpötilassa

$R_{p0,2\ t}$ = Materiaalin 0,2 % venymäraja lämpötilassa t

p_d = Suunnittelupaine

0,2 % venymärajojen suhdetta käytetään ferriittisille sekä austeniittisille teräksille, joiden vähimmäismurtovenymän arvo on < 30 %. Austeniittisille teräksille joiden vähimmäismurtovenymä on ≥ 30 %, käytetään 1,0 % venymärajojen suhdetta:

$$p_{\text{test.req}} = \max \left\{ 1,43p_d; 1,25p_d \frac{R_{p1,0.20}}{R_{p1,0t}} \right\}, \quad (7)$$

missä $R_{p1,0.20}$ = 1,0 % venymäraja 20 °C lämpötilassa

$R_{p1,0t}$ = 1,0 % venymäraja lämpötilassa t

Kattilastandardi vaatii käyttämään laskentapainetta p_c vaaditun koepaineen $p_{\text{test.req}}$ laskennassa. Laskentapaine p_c sisältää hydrostaattisen paineen p_{hydr} :

$$p_c = p_d + p_{\text{hydr}} \quad (8)$$

Vaaditun koepaineen laskennassa käytetään suunnittelupainetta p_d , koska hydrostaattinen paine otetaan huomioon mittarin näyttämässä sekä suurimman sallitun koepaineen laskennassa. Mittarin näyttämään vaikuttaa mittarin korko testattavassa järjestelmässä.

Putkistostandardissa SFS-EN 13480-5:2017 vaadittu koepaine lasketaan kaavalla:

$$p_{\text{test.req}} = \max \left\{ 1,43p_d; 1,25p_d \frac{f_{\text{allo},20}}{f_{\text{allo},nc}} \right\}, \quad (9)$$

missä $f_{\text{allo},20}$ = suunnittelujännitys lämpötilassa 20 °C lämpötilassa

$f_{\text{allo},nc}$ = suunnittelujännitys ajasta riippumattomilla arvoilla lämpötilassa t

Seuraavaksi käydään esimerkki läpi, jolla havainnollistetaan putkistostandardin ja kattilastandardin vaaditun koepaineen kaavojen eroa. Taulukossa 1 lähtötiedot esimerkillä.

Taulukko 1. Lähtötiedot vaaditun koepaineen laskentaan.

Material standard	EN 10216-2:2013	
Material	X10CrMoVNb9-1	
$R_{p0,2.20}$	450.0	MPa
$R_{p0,2t}$	278.8	MPa
$R_{m.20}$	630.0	MPa
p_d	9.9	MPa
p_{hydr}	0.0	MPa
p_c	9.9	MPa
t	535.4	°C
t_R	16.0	mm

Taulukossa 1 on ilmoitettu materiaalin lujuusarvot huoneenlämpötilassa sekä lämpötilassa t . Lujuusarvojen haku on tapahtunut edustavan seinämäpaksuuden t_R mukaan. Putkistostandardin mukaisen vaaditun koepaineen laskentaa varten lasketaan suunnittelujännityksen $f_{\text{allo},20}$ arvo lämpötilassa 20 °C kaavalla (SFS-EN 12952-3:2012):

$$f_{\text{allo},20} = \min \left\{ \frac{R_{m,20}}{2,4}; \frac{R_{p0,2,20}}{1,5} \right\} \quad (10)$$

Sijoitetaan lujuusarvot kaavaan 10 ja saadaan:

$$f_{\text{allo},20} = \min \left\{ \frac{630 \text{ MPa}}{2,4}; \frac{450 \text{ MPa}}{1,5} \right\} = \min\{262,5 \text{ MPa}; 300 \text{ MPa}\} = 262,5 \text{ MPa} \quad (11)$$

Eli huoneenlämpötilan mukainen suunnittelujännitys $f_{\text{allo},20}$ määräytyy murtolujuuden mukaan. Ajasta riippumattomien ominaisuuksien mukainen suunnittelujännitys $f_{\text{allo},nc}$ lämpötilassa t määräytyy seuraavalla tavalla (SFS-EN 12952-3:2012):

$$f_{\text{allo},nc} = \min \left\{ \frac{R_{m,20}}{2,4}; \frac{R_{p0,2,t}}{1,5} \right\} \quad (12)$$

Sijoitetaan lämpötilan t mukainen 0,2 % venymärajan arvo kaavaan:

$$f_{\text{allo},nc} = \min \left\{ \frac{630 \text{ MPa}}{2,4}; \frac{278,8 \text{ MPa}}{1,5} \right\} = \min\{262,5 \text{ MPa}; 185,9 \text{ MPa}\} = 185,9 \text{ MPa} \quad (13)$$

Nyt voidaan kaavan 9 avulla laskea putkistostandardin mukainen vaadittu koeponnistuspaine:

$$p_{\text{test,req}} = \max \left\{ 1,43 \cdot 9,9 \text{ MPa}; 1,25 \cdot 9,9 \text{ MPa} \cdot \frac{262,5 \text{ MPa}}{185,9 \text{ MPa}} \right\} = \min\{14,1 \text{ MPa}; 17,5 \text{ MPa}\} \quad (14)$$

$$= 17,5 \text{ MPa}$$

Näin ollen taulukon 1 esimerkin putkelle putkistostandardin mukainen koepaine olisi 17,5 MPa. Seuraavaksi kaavan 6 avulla lasketaan kattilastandardin mukainen vaadittu koepaine samalle putkelle:

$$p_{\text{test,req}} = \max \left\{ 1,43 \cdot 9,9 \text{ MPa}; 1,25 \cdot 9,9 \text{ MPa} \cdot \frac{450 \text{ MPa}}{278,8 \text{ MPa}} \right\} = \max\{14,1 \text{ MPa}; 20,0 \text{ MPa}\} \quad (15)$$

$$= 20,0 \text{ MPa}$$

Kattilastandardin SFS-EN 12952-3:2012 mukaiseksi koepaineeksi näin ollen määräytyisi 20,0 MPa. Eroa tulee siis noin 2,5 MPa tässä esimerkissä. Eroavaisuuksiin vaikuttaa lämpötila sekä käytetty aihio. Esimerkissä on korkeassa lämpötilassa toimiva putki. Samanlaisia eroavaisuuksia havaittiin muissakin tapauksissa. Standardien tulisi kuitenkin antaa samoja tuloksia, koska kaavat ovat tehty painelaitedirektiivin pohjalta. Jos vaaditun koepaineen laskentatavat pidettäisiin erillään edelleen, jouduttaisiin pitämään silmällä putkistostandardin mukaan laskettuja koepaineita. Kattilastandardissa ASME Section 1:2017 nestepainekokeen vaaditun koepaineen laskenta on hieman yksinkertaisempi. Vaadittu koepaine $p_{\text{test.req}}$ lasketaan kaavalla:

$$p_{\text{test.req}} = 1,5p_d \quad (16)$$

Putkistostandardin ASME B31.1:2016 nestepainekokeen vaadittu koepaine $p_{\text{test.req}}$ lasketaan myös kaavan 16 tavalla.

3.3.2 Kaasupainekoe

Kaasupainekoe ei ole kovin yleinen, mutta sitä tehdään järjestelmille jotka ovat herkkiä vedelle tai vesijäänteille. Koepaineen arvon kaasupainekokeelle voisi laskea putkistostandardin SFS-EN 13480-4:2017 mukaan samalla tavalla kuin nestepainekokeelle kaavalla 9, mutta kaasupainekokeen vaarallisuudesta johtuen halutaan käyttää standardin SFS-EN 13480-5:2017 kohdan 9.3.3 f) mukaista koepaineen arvoa:

$$p_{\text{test.req}} = 1,1p_d. \quad (17)$$

Jos nestepainekoe korvataan kaasupainekokeella, tulee painekokeen lisäksi NDT-tarkastuslaajuutta laajentaa. Standardin SFS-EN 13480-5:2017 taulukossa 9.3.3-1 esitetään NDT-tarkastuslaajuudet, kun vesipainekoe korvataan kaasupainekokeella.

ASME B31.1:2016 mukainen vaadittu kaasupainekokeen arvo lasketaan seuraavalla tavalla:

$$p_{\text{test.req}} = 1,2p_d. \quad (18)$$

Samaisesta putkistostandardista ASME B31.1:2016 löytyy suurimmalle sallitulle kaasupainekokeen arvolle kaava. Kaasupainekokeessa yhdenkään komponentin paine ei saa olla suurempi kuin (ASME B31.1:2016):

$$p_{\text{test.allo}} = 1,5p_d. \quad (19)$$

3.4 Suurin sallittu koepaine

Vaaditun koepaineen laskennan lisäksi jokaiselle erilliselle osalle ja tilalle tulee laskea suurin sallittu koepaine. Suurimman sallitun koepaineen on tarkoitus varmistaa, ettei yhdessäkään komponentissa ole liian suuria jännityksiä painekokeen aikana. Standardit SFS-EN 13445-3:2014, SFS-EN 13480-3:2017 sekä SFS-EN 12952-3:2012 rajoittavat jännitykset niin, ettei yhdessäkään komponentissa ole suurempia jännityksiä kuin 95 % myötörajusta. Austeniittisilla teräksillä vähimmäismurtovenymän ollessa ≥ 35 % jännitykset rajataan joko 95 % myötörajusta tai 45 % murtorajasta riippuen siitä, kumpi arvo on suurempi (SFS-EN 13480-3:2017). Koeolosuhteiden sallituista jännityksistä f_{est} lisää kappaleessa 3.2.

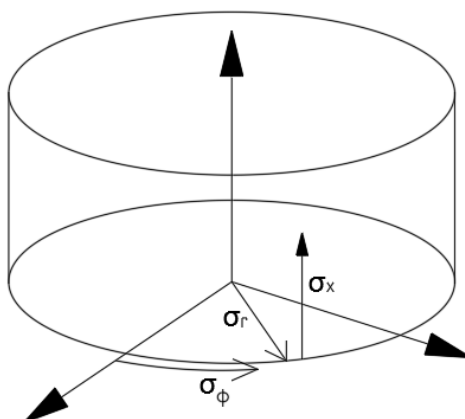
Suurimman sallitun koepaineen laskenta perustuu olettamukseen, että rakenteesta löytyy minimiseinä. Minimiseinä voi tulla valmistuksen yhteydessä esimerkiksi putkitaipeseen tai on tarkoituksellisesti koneistettu komponenttiin. Suurimman sallitun koepaineen laskenta ei siis vaadi minimiseinän toteutumista, mutta sallii sen. Tämä sääntö pätee ainakin pitkillä tuotteilla, koska detaljisuunnittelussa saatetaan tehdä myöhemmin päätöksiä seinämän ohentamisesta. Tällainen tilanne voi tulla vastaan, kun suunnitellaan liitosta eri kokoisten putkien välille. Oletamus minimiseinästä on siis varmalla puolella, koska koepaineet määritellään esisuunnittelussa.

Paineastioiden mitoituskaavat perustuvat TRESCAN myötöehtoon. TRESCAN leikkausjännityshypoteesin perusmuoto on (Heikkilä & Huhdankoski, 1999):

$$\tau_{\text{vert}} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (20)$$

missä σ_1 ja σ_2 ovat pääjännityksiä. Hypoteesin mukaan materiaali alkaa myötämään jännitysten noustessa yli leikkausmyötörajan. (Salmi & Pajunen 2010.) Sylinterimäisessä paineen kuormittamassa ohutseinäisessä lieriössä esiintyy kolme pääjännitystyyppiä (Heikkilä & Huhdankoski 1999):

- kehän suuntaiset kalvojännitykset σ_ϕ
- säteen suuntaiset jännitykset σ_r
- pituussuuntaiset jännitykset σ_x



Kuva 1. Sylinterimäisen kappaleen paineen aiheuttamat jännitykset.

Kehän suuntaiset kalvojännitykset σ_φ ratkaistaan kaavalla (Heikkilä & Huhdankoski 1999):

$$\sigma_\varphi = \sigma_1 = \frac{p_c d_{ia}}{2e_{rs}}, \quad (21)$$

missä p_c = laskentapaine
 d_{ia} = sisähalkaisija
 e_{rs} = todellinen seinämänpaksuus

Pituussuuntaiset jännitykset σ_x ratkaistaan kaavalla (Heikkilä & Huhdankoski 1999):

$$\sigma_x = \frac{p_c d_{ia}}{4e_{rs}} \quad (22)$$

Paineastioissa kuormitus tulee pääasiassa sisäisestä paineesta. Säteen suuntaiset jännitykset σ_r vaikuttavat lieriön seinämänpaksuuden yli ja ovat pieniä verrattuna muihin jännityksiin (Putkinen 2014, s. 21). Tällöin säteen suuntaiseksi jännitykseksi σ_r käytetään ulkoisen ja sisäisen paineen aiheuttaman jännityksen keskiarvoa (Heikkilä & Huhdankoski 1999):

$$\sigma_r = \frac{-p_{c,i} + p_{c,o}}{2}, \quad (23)$$

missä $p_{c,i}$ = sisäpuolinen laskentapainepaine
 $p_{c,o}$ = ulkopuolinen laskentapainepaine

Ainoastaan sisäisen paineen vaikuttaessa rakenteessa säteen suuntaisiksi jännityksiksi saadaan:

$$\sigma_r = \sigma_2 = -\frac{p_{c,i}}{2} \quad (24)$$

Näissä kaikissa jännitystyypeissä jännitykset ovat suoraan verrannollisia paineeseen. Näiden perusteella voidaan sanoa, että suunnittelupaine sekä -jännitys ovat suoraan verrannollisia toisiinsa. Perustuen olettamukseen, että rakenteesta löytyy suunnittelupainetta p_d ja suunnittelujännitystä f_{allo} vastaava minimiseinämä, voidaan suurimman sallitun koepaineen $p_{test,allo}$ laskentakaava kirjoittaa muotoon:

$$\frac{p_{test,allo}}{p_c} = \frac{f_{test}}{f_{allo}}, \quad (25)$$

missä p_c = laskentapaine
 $p_{test,allo}$ = suurin sallittu koeponnistuspaine
 f_{test} = suunnittelujännitys koeolosuhteissa
 f_{allo} = suunnittelujännitys lämpötilassa t

Yhtälöstä 25 saadaan kaava suurimmalle sallitulle koepaineelle $p_{\text{test.allo}}$:

$$p_{\text{test.allo}} = p_c \frac{f_{\text{test}}}{f_{\text{allo}}} \quad (26)$$

Laskentapaine p_c sisältää suunnittelupaineen p_d sekä hydrostaattisen paineen p_{hydr} . Suunnittelujännitys f_{allo} on sama kuin komponentin lopputuotteena mitoitukseseen käytetty suunnittelujännitys, eli on mahdollista, että suunnittelujännitys määräytyy virumismurtolujuuden mukaan. Suunnittelujännityksen arvona koelosuhteessa f_{test} käytetään kappaleessa 3.2 käsiteltyjä arvoja. Samalla kaavalla lasketaan suurin sallittu koepaine sekä ASME-, että EN-tapauksissa.

3.5 Hydrostaattinen paine koepaineessa

Hydrostaattinen paine vaikuttaa mittarin näyttämään, joka voidaan korjata ottamalla huomioon korkeusasemat (SFS-EN 13480-5:2017). Koepaine tulisi muuttua niin, että mittarin näyttämä olisi oikein ja valitun komponentin mukainen paine saavutetaan. Koepaine määräytyy jonkin komponentin mukaan, joka sijaitsee jossain tietyssä korkeudessa. Jotta valittu koepaineen arvo toteutuisi sen komponentin korkeudessa, tulee hydrostaattisen paineen vaikutus ottaa huomioon. Määräävän komponentin ja mittarin sijaitessa samassa korkeudessa, hydrostaattista painetta ei tarvitse ottaa huomioon. Komponentin tai mittarin sijaitessa eri korkeudessa toisistaan, tulee hydrostaattisen paineen vaikutus huomioida mittarin näyttämässä. Järjestelmä testataan virheellisesti hydrostaattisen paineen verran korkeammalla arvolla, jos mittari sijaitsee lieriöllä ja komponentti, minkä mukaan koepaine on määräytynyt matalammalla. Jos taas mittari sijaitsee alempana kuin komponentti, jonka mukaan koepaine on määräytynyt, testataan järjestelmä hydrostaattisen paineen verran pienemmällä paineella.

Mittarin näyttämä lukema voidaan korjata ottamalla huomioon mittarin sekä komponentin korko koepaineen arvoissa. Korkeusasemat huomioiden valittu koepaineen arvo muutetaan arvoon (JSM 2012-11-29 Boiler Code EN 12952-3 2012):

$$p_{\text{test.gauge}} = p_{\text{test}} + p_{\text{hydr.comp}}, \quad (27)$$

missä p_{test} = valittu koepaine

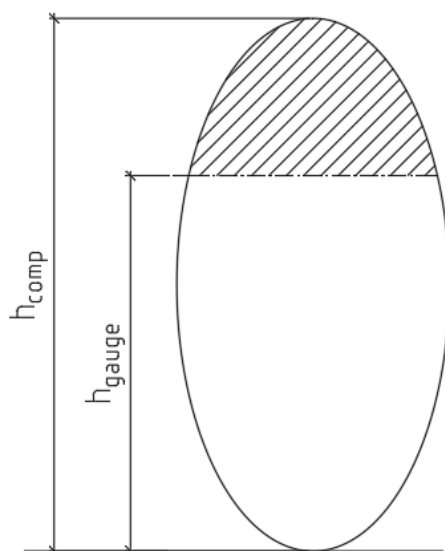
$p_{\text{hydr.comp}}$ = komponenttikohtainen hydrostaattinen paine

Mittarin näyttämään vaikuttava hydrostaattinen paine $p_{\text{hydr.comp}}$ lasketaan kaavalla (Tekniikan kaavasto 2013):

$$p_{\text{hydr.comp}} = \rho g (h_{\text{comp}} - h_{\text{gauge}}), \quad (28)$$

missä ρ = väliaineen tiheys
 g = putoamiskiihtyvyys
 h_{comp} = komponentin korko
 h_{gauge} = mittarin korko

Kuvassa 2 on havainnollistettu mittarin näyttämään vaikuttava hydrostaattinen paine. Mittarin näyttämään vaikuttaa mittarin yläpuolella vaikuttava vesipatsas. Kuvassa on kuvitteellinen tila, joka on täytetty vedellä. Painemittari on sijoitettu korkeuteen h_{gauge} ja viivoitettu alue havainnollistaa mittarin näyttämään vaikuttavaa vesimassaa. Määrävä komponentti sijaitsee tässä esimerkissä korkeudessa h_{comp} .



Kuva 2. Havainnollistava kuva mittarin näyttämään vaikuttavasta hydrostaattisesta paineesta.

3.6 Koepaineen määrittäminen

Koepaineen määrittäminen tapahtuu koeponnistettavan osakokonaisuuden heikoimman lenkin mukaan. Jokaiselle koeponnistettavan kokonaisuuden putkelle ja päädylle on laskettu vaadittu koepaine sekä suurin sallittu koepaine. EN- tai ASME-standardit eivät eroa testattavan alueen koepaineen valitsemisesta. Koepainetta valittaessa huomioidaan testattavan kokonaisuuden jokainen komponentti.

Taulukossa 2 on esitetty esimerkki 1. Ensimmäisenä valitaan vaaditusta koepaine $p_{\text{test,req}}$ sarakkeesta suurin vaadittu koepaineen arvo, joka tässä esimerkissä on 180 bar. Seuraavaksi tarkistetaan suurimman sallitun koepaineen $p_{\text{test,allo}}$ sarakkeesta pienin suurin sallittu koepaine. Tässä esimerkissä pienin suurin sallittu koepaine on 190 bar, joka on isompi kuin suurin vaadittu koepaine. Näin ollen koepaineeksi p_{test} määräytyy komponentin 2 suurin vaadittu koepaine 180 bar.

Taulukko 2. Esimerkki 1 koepaineen valitsemisesta.

	$p_{\text{test,req}}$ [bar]	$p_{\text{test,allo}}$ [bar]
Komponentti 1.	150	200
Komponentti 2.	180	210
Komponentti 3.	170	250
Komponentti 4.	176	230
Komponentti 5.	140	190

Taulukossa 3 on esitetty esimerkki 2. Nyt suurin vaadittu koepaineen arvo on 180 bar. Pienin suurin sallittu koepaineen arvo on 170 bar. Näin ollen koepaineeksi p_{test} valikoituisi 170 bar. Koepaineen valinta perustuu aiemmissa kappaleissa käsiteltyyn liian suurien jännitysten rajaamiseen painekokeen aikana.

Taulukko 3. Esimerkki 2 koepaineen valitsemisesta.

	$p_{\text{test,req}}$ [bar]	$p_{\text{test,allo}}$ [bar]
Komponentti 1.	150	190
Komponentti 2.	180	205
Komponentti 3.	170	210
Komponentti 4.	176	220
Komponentti 5.	140	170

Väärällä koepaineella testaaminen voi johtaa rakenteiden hajoamiseen. Koeponnistuksen on tarkoitus tuoda esiin valmistukselliset virheet turvallisissa olosuhteissa, eikä käytönaikana odottamattomasti. Kuvassa 3 on koeponnistuksessa rikkoutunut kammio. Vaurio johtui liian suuresta koepaineesta. Tapauksen syyn selvityksessä oli ilmennyt, että koeponnistuspaineet olivat nousseet huomattavasti suuremmiksi määritettyyn paineeseen verrattuna. Vaurion vuoksi jouduttiin valmistamaan uudestaan neljä kuvan 3 kammiota ja muitakin komponentteja, jotka vaurioituivat liian suuresta koepaineesta (2015-06-23 Painelaitelaskijoiden forum, 2015).



Kuva 3. Koeponnistuksessa vaurioitunut kammio (2015-06-23 Painelaitelaskijoiden forum, 2015).

3.7 Neste/kaasupainekokeen korvaaminen

Neste- ja kaasupainekoe voidaan joutua korvaamaan samanarvoisilla testeillä, jos laitekokonaisuus sisältää komponentteja, jotka eivät salli vesijäämiä tai koeponnistus on muuten hankalasti toteutettavissa. Tällaisiin tapauksiin kuuluu esimerkiksi varoventtiilien ulospuhallusputket. Tällaisissa tapauksissa kaikille painetta kantaville hitseille suoritetaan 100 % NDT-tarkastus. Muita hankalia ja haasteita aiheuttavia apujärjestelmiä ovat paineilmalaitteistot, polttimien kaasu- ja öljyputkistot sekä ammoniakkin syöttölaitteet. Erikseen koeponnistettujen laitekokonaisuuksien jälkeisen liitoksen eheys todetaan myös 100 % NDT-tarkastuksella. (Kortelainen, 2018)

3.8 Paineekokeen suoritus

Paineekoetta varten tulee varautua riittäväillä turvallisuustoimenpiteillä sekä on selvitettävä mahdolliset kokeesta aiheutuvat vaarat. Ennen varsinaista painekoetta tulisi tehdä alustava koeponnistus suurimmalla sallitulla paineella, jonka tarkoituksena on havaita merkittävät vuotokohdat. Alustavan koeponnistuksen tarkoitus on välttää toistuvaa ylipaineistamisesta aiheutuvaa vaaraa ja turhaa työtä. (SFS-EN 12952-6:2011.) Vesipainekokeessa käytettävän veden tulee olla laadultaan korroosiota sekä jäännösepäpuhtauksia ehkäisevää. Haurasmurtumavaaran vuoksi veden lämmön tulee olla riittävän korkea ja painekoe suoritetaan huoneenlämpötilassa. Veden lämpötila ei saa kuitenkaan ylittää painekokeen aikana 50 °C (SFS-EN 12952-6:2011). Järjestelmään voidaan joutua syöttämään lämpimämpää vettä kuin 50 °C, jotta painekokeen aikana lämpötila saadaan pysymään riittävän korkealla.

Vesi- ja kaasupainekokeessa koepaine nostetaan ensin noin 50 % arvoon määritetystä koepaineesta. Painetta nostetaan tämän jälkeen asteittain noin 10 %-yksikköä kerrallaan vaaditusta koepaineesta. Vesipainekokeessa määritettyä koepainetta pidetään yllä vähintään 30 minuuttia. Kaasupainekokeessa määritettyä koepainetta ylläpidetään 10 minuuttia. Painekokeen aikana testattaviin osiin ei saa aiheuttaa iskumaista kuormitusta. Tarkastamista varten järjestelmän paine lasketaan suunnittelupaineeseen p_d . Tarkastuspaineessa rakenteille ja hitsausliitoksille suoritetaan silmämääräinen tarkastus kaikille pinnoille. Mikäli kaasupainekokeessa koepaine on määritetty kohdan 3.3.1 kaavan 9 mukaan, lasketaan tarkastuspaine p kaavalla (SFS-EN 13480-5:2017):

$$p_i = p_d \frac{f_{\text{allo.20}}}{f_{\text{allo.nc}}}. \quad (29)$$

Jos taas kaasupainekokeen koepaineena on käytetty kaavan 17 arvoa, tarkastuspaineen arvona käytetään suunnittelupainetta p_d .

Painekoe on hyväksytty, jos rakenteissa ei havaita minkäänlaisia vuotoja tai muodonmuutoksia. (SFS-EN 13480-5:2017.) Painekokeen hylkäysperuste voi olla tarkastuksissa havaittu korjauksen tarve tai väärässä paineessa tarkastetut rakenteet. Erästä tapausta, jossa tarkastaminen suoritettiin käyttöpaineessa suunnittelupaineen p_d sijaan, ei voitu hyväksyä. Tapauksen jälkeen jouduttiin suorittamaan uudestaan täysimittainen painekoe, jonka jälkeen tarkastus suoritettiin suunnittelupaineessa p_d . Kokeen olisi voinut hyväksyä, jos rakenteiden tarkastus olisi suoritettu nostamalla paine suunnittelupaineeseen p_d (Kortelainen 2018). Tällaiselle tapaukselle ei ole selkeää linjaa kuinka toimia. Menettelystä sovitaan aina tapauskohtaisesti.

4 KOEPONNISTUKSEN APUOSAT

Kattilalaitoksen rakentamisvaiheessa suoritetaan eri osakokonaisuuksien koeponnistuksia. Osakokonaisuuksia koeponnistettaessa tulpataan auki jäävät päädyt väliaikaisesti koeponnistuspäädillä. Koeponnistuspäädystä käytetään tässä työssä nimitystä apuosa. Apuosiin päädyn lisäksi kuuluu päätyyn hitsattava yhde, johon kiinnitetään esimerkiksi ilmaus- tai tyhjennysventtiili. Apuosat on syytä mitoitaa suunnittelijan vapaasti valittavien mittojen osalta apulaitteen varmuudella. Apulaitteen varmuudella tarkoitetaan samaa varmuutta, kuin suunniteltaisiin tuotetta lopputuotteena. Päädyn varmuusluvuista ja suunnittelujännityksistä kerrotaan lisää kappaleessa 4.7. Vapaasti valittavilla mitoilla tarkoitetaan mittoja, jotka ovat päädyn suunnittelijan valittavissa painekoetta varten. Koeponnistuksen onnistumista ei ole siis ainakaan estämässä epävarmaksi suunniteltu väliaikainen pääty. Epäonnistuneen koeponnistuksen takia jouduttaisiin tekemään uusi koeponnistus sekä rikkoutunut pääty voisi aiheuttaa henkilövahinkoja, joka itsessään on hyvä syy mitoitaa koeponnistuspääty kestäväksi. Kuvassa 4 on esitetty eräällä työmaalla käytetty koeponnistuspääty, joka oli varustettu yhteellä.

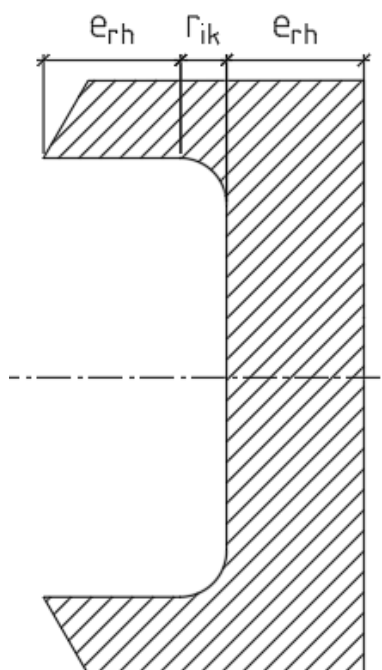


Kuva 4. Koeponnistuspääty varustettu yhteellä.

4.1 Eri päätytyypeistä

Standardi SFS-EN 12952-3:2012 sisältää erilaisia päätytyyppejä sekä päätykohtaiset mitoitusvaatimukset ja muut valmistukselliset vaatimukset. Tässä työssä käsitellään ainoastaan standardin SFS-EN 12952-3:2012 kohdan 10.3.1 e) -päätyä. Tavoitteena on käyttää samaa päätyä myös ASME-kattiloiden koeponnistuskokonaisuuksissa ja lopputuotteena. Päädyn käyttämistä ASME-kattiloissa pidetään mahdollisena, koska ASME-standardi sallii analyysimenetelmään perustuvan suunnittelun. ASME Section 8 2017 Division 2 jakaa analyysimenetelmään perustuvat vaatimukset eri vaurioitumismuoto - luokkiin. Standardin SFS-EN 12952-3:2012 päätyjen sekä putken seinämän sallittuihin jännityksiin perustuvat kaavat katsotaan lukeutuvan luokkaan, jolla estetään materiaalin myötämisestä johtuva rakenteen hajoaminen. (ASME Section VIII:2017.)

Standardi ASME Section 1:2017 tarjoaa myös omaa suoraa päätyä. ASME Section 1 mukaista suoraa päätyä ei haluta käyttää, koska ASME Code Case 2697 vaatii päädyn paksuussuuntaista testaamista vetokokeen avulla, vaikka pääty valmistettaisiin taeaihiosta. Taeaihiossa ei esiinny lamellirepeilyriskiä, joten vaatimusta vetokokeesta pidetään turhana (The Welding institute 2000). Taonnan puristusjännityksestä aiheutuva materiaalin virtaus sekä korkean lämpötilan aiheuttama uudelleenkiteytyminen rikkoo suotaumia sekä lisää materiaalin homogeenisuutta (Järvinen 2016). Näin ollen taot-
tuun aihioon ei jää samanlaisia lamellimaisia kerroksia kuten valssatuissa teräslevyissä. ASME Code Case 2697:2015 versiossa oli myös tarpeeton vaade koko päädyn paksuudelle. 2015 vuoden versiossa koko päädyn paksuudeksi muodostui 2 kertaa päädyn seinämänpaksuus e_{th} + sisäpuolinen pyöröstys r_{ik} , joka on havainnollistettu kuvassa 5. CodeCase 2697-1:2017 versioon on tullut päivitys, jossa paksuusvaatimus oli muutettu. Lisäliite ”-1” kertoo, kuinka monta kertaa kyseistä tapausta on revisioitu. Uudessa versiossa koko paksuudeksi muodostuu päädyn todellinen paksuus e_{th} + sisäpuolinen säde r_{ik} . Paksuussuuntainen testaaminen on vielä kuitenkin säilynyt, joten ei ole syytä hylätä tavoitetta käyttää EN-tyypin päätyä ASME-kattiloissakin.

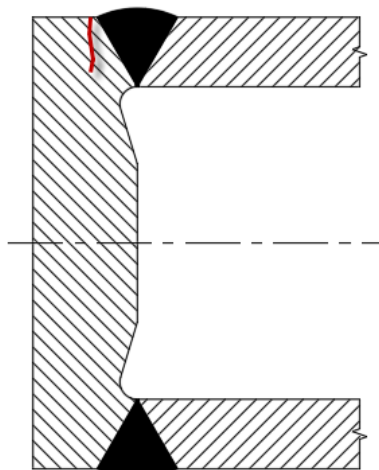


Kuva 5. ASME Code Case 2697:2015 päätytyyppi.

ASME Code Case on esistandardi, jossa käsitellään tarve muutokselle tai lisäykselle jo olemassa olevaan standardiin. ASME Boiler and Pressure Vessel Code -komiteat kokoontuvat säännöllisesti käsittelemään ehdotettuja standardin muutoksia. Code Casejen on tarkoitus vastata nopeisiin tarpeisiin, kun olemassa olevat standardit eivät sisällä tarvittavia sääntöjä suunnittelua tai materiaaleja varten. Esitetyt muutokset tai lisäykset viedään loppujen lopuksi seuraavaan ASME Boiler and Pressure Vessel standardipäivitykseen. (ASME Code Cases:2017.)

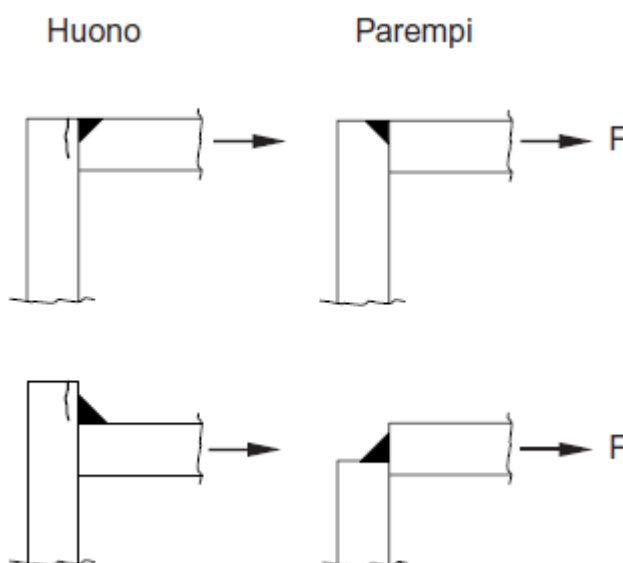
4.2 Lamellirepeily

Teräslevyjen rakenne ei ole täysin homogeeninen. Teräslevyn rakenne koostuu lamellimaisista kerroksista. Lamellimaiset kerrokset syntyvät valssauksen aikana, kun metalliseoksen rakeet puristuvat mikrorakennetasolla limittäin valssaussuunnan mukaisesti. (SIGNS 2009.) Lamellikerroksien repeilyä ilmenee hitsatuissa liitoksissa, jos levyyn kohdistuu kohtisuorasti vetojännitystä. Vetojännitystä voi aiheuttaa ulkoinen kuorma tai hitsauksen aiheuttama kutistumisjännitys. (Ongelin & Valkonen 2016.) Lamellirepeilyn riskiä nostaa liitoksen ollessa leikatun reunan läheisyydessä kuten kuvassa 6 on esitetty. Repeilyn aiheuttaa jäykästä rakenteesta johtuva hitsin kutistumisen estäminen. Suuria jännityksiä syntyy eritoten monipalkohitsien viimeisen palon jäähtyessä. (Niemi 2003.) Monipalkohitsejä käytetään rakenteissa, kun yksipalkohitsi ei ole mahdollinen. Työssä käsiteltävät päädyt hitsataan pääsääntöisesti monipalkohitseinä johtuen suurista seinämäpaksuuksista.



Kuva 6. Lamellirepeilyn mahdollinen sijainti päittäishitsattavassa päädyssä.

Lamellirepeilyn riskiä voidaan pienentää liitoksen muotoilulla, hitsauksen jälkeisellä ultraäänitarkastuksella tai Z-teräksillä. Ennen hitsausta tehtävä ultraäänitarkastus ei paljasta levyn taipumusta lamellirepeilyyn. Ainoastaan kuonasulkeumat ja valssausvirheet voidaan havaita etukäteistarkastuksella, jolla voidaan välttää epäkurantin materiaalin käyttöä. Hitsauksen jälkeisellä ultraäänitarkastuksella nähdään hitsauksen kutistumisjännityksistä aiheutunut lamellirepeily. Z-teräksillä tarkoitetaan teräslevyjä, joille on suoritettu paksuussuntaisten ominaisuuksien parantaminen terästehtaalla. (Niemi 2003.) Hitsauksen suorituksella voidaan myös pienentää lamellirepeilyriskiä. Hitsatessa suuremmalla energialla saadaan parempi tunkeuma ja leveämpi hitsi, jolloin muodonmuutokset levyn paksuussuunnassa yltävät syvemmälle. Liitoksen muotoilulla pyritään siihen, että ulkoiset kuormat eivät aiheuttaisi levyn paksuussuuntaista vetokuormitusta. Kuvassa 7 havainnollistettu, kuinka yleisesti liitoksen muotoilulla voidaan pienentää lamellirepeilyn riskiä. (Ongelin & Valkonen 2016.)



Kuva 7. Liitoksen yleisiä parannusehdotuksia lamellirepeilyriskiä pienentäen (Niemi 2003).

Putken tai kammion päädyn murtuminen voi aiheuttaa vakavia seurauksia. Tästä syystä lamellirepeilyriski on otettava huomioon. Pääty suunnitellaan standardin ohjeiden mukaan. Standardi SFS-EN 12952-3:2012 vaatii Z35 taatun materiaalin käyttöä sekä ultraäänitarkastusta hitsausviisteen kohdalta, jos pääty valmistetaan levyaihiosta. Standardi SFS-EN 10164:2005 sisältää kolme eri Z-luokkaa, joita ovat Z15, Z25 ja Z35. Vaaditun vähimmäismurtokurouman todentaminen tapahtuu paksuussuuntaisella vetokokeella, jossa vähintään kolmen kokeen murtokurouman keskiarvon on oltava vähintään vaaditun Z-luokan mukainen.

Amerikkalainen standardi ASTM A770/A770M sisältää myös Z-teräksen määritelmän, mutta luokkia on vain yksi, joka takaa 20 % vähimmäismurtokurouman. ASTM standardin mukaan taattu levy merkitään lisämerkillä ZT. (ASTM A770/A770M 2003.)

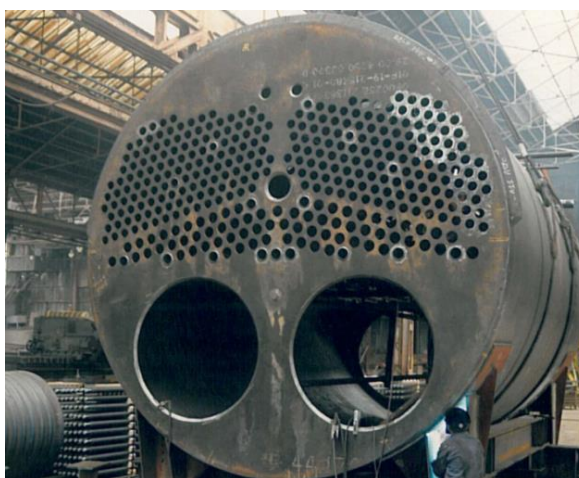
Taulukosta 4 nähdään lamellirepeilyn olevan erittäin harvinainen paksuussuuntaisen murtokurouman ollessa 20 % mutta alle 35 %. Erittäin epätodennäköisenä lamellirepeilyä pidetään paksuussuuntaisen murtokurouman ollessa 35 % tai enemmän. ZT-takuuta voidaan pitää riittävänä vaatimuksena ASME-materiaaleista tehdyillä päädyillä. Paremmat levyn paksuussuuntaiset ominaisuudet eivät kuitenkaan takaa, etteikö lamellirepeilyä esiintyisi. Lamellirepeilyriskiin vaikuttaa niin moni asia, mutta parempien materiaalien paksuusominaisuuksien vaatimisella voidaan pienentää riskiä. (Rautaruukki Oyj 2007.)

Taulukko 4. Lamellirepeilyn todennäköisyys (Ongelin & Valkonen 2016, s. 329).

Paksuussuuntainen murtokurouma (%)	Lamellirepeilyn todennäköisyys
$Z < 10$	Mahdollinen jo lievästi levyn paksuussuunnassa kuormitettavissa hitsausliitoksissa.
$10 \leq Z < 15$	Mahdollinen kohtuullisesti levyn paksuussuunnassa kuormitettavissa hitsausliitoksissa.
$15 \leq Z < 20$	Mahdollinen voimakkaasti levyn paksuussuunnassa kuormitettavissa hitsausliitoksissa.
$20 \leq Z < 35$	Erittäin harvinainen.
$Z \geq 35$	Erittäin epätodennäköinen.

4.3 Päittäishitsattu suora pääty

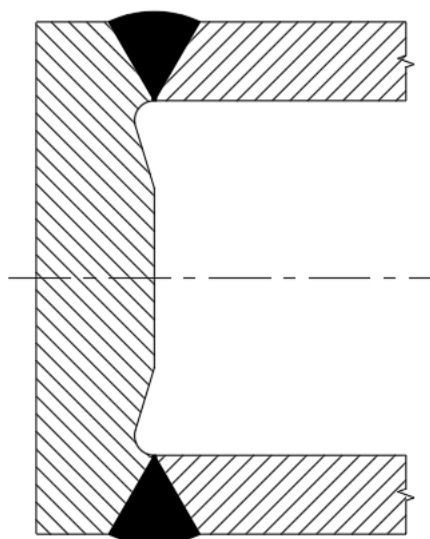
Suoria tukemattomia pätyjä löytyy kattilastandardista SFS-EN 12952-3:2012 seitsemän erilaista. Suoralla tukemattomalla päädyllä tarkoitetaan pätyä, jota ei ole tuettu ulkoisesti erillisillä sidetangoilla, -putkilla, polvilevyillä tai niiden yhdistelmillä. Tuettujen pätyjen mitoitus tapahtuisi standardin SFS-EN 12953-3:2016 mukaan. Tuetulla päädyllä tarkoitetaan ulkoisesti tuettuja pätyjä, joita käytetään tulitorvikattiloissa. Tuettu pääty esiintyy tulitorvikattilan tuliputkiryhmässä, jossa putkiryhmä on tuettu reikälevyllä, kuten kuvassa 8 on esitetty. Tuettuja pätyjä ei käsitellä tässä työssä, koska vesiputkikattiloissa ei esiinny samanlaisia rakenteita. Tukemattoman päädyn termiä pidetään hieman harhaan johtavana verrattuna tuettuun pätyyn, koska päädyn tarkoitus on hieman erilainen tulitorvikattilassa. (SFS-EN 12953-3:2016)



Kuva 8. Tulitorvikattilan tuliputkiryhmästä havainnollistava kuva (Fire tube boiler with 2 gas burners, 2012).

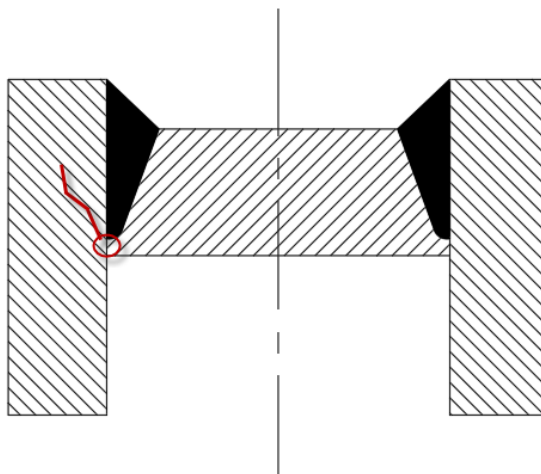
Jokaiselle erilaiselle pätymallille on omia valmistuksellisia tai geometrisia vaatimuksia. Yrityksen suosima standardin SFS-EN 12952-3:2012 kohdan 10.3.1 e) kevennysurallinen pääty päittäishitsataan vaippaan. Katso kuva 9. Päättytyyppi on muihin vaihtoehtoihin verrattuna lujusteeknisesti parempi. Hitsin juuresta tulee hyvälaatuinen eikä upotettuihin pätyihin verrattuna päädyn ja vaipan väliin jää rakoa, johon helposti muodostuisi korroosiopesäke. Päädylle ei ole myöskään asetettu suurinta sallittua putken sisähalkaisijaa. Esimerkiksi standardin SFS-EN 12952-3:2012 kohdan 10.3.1 d) päättyvaihtoehtoa voidaan käyttää ainoastaan 600 mm sisähalkaisijaltaan tai sitä pienemmissä putkissa tai kammioissa. Kohdan e) päädyllä ei myöskään ole muita materiaaliominaisuusvaatimuksia kuin laadultaan Z35 levyn käyttö, jos pääty valmistetaan levyaihiosta. Yhden päättytyyppin suosiminen yksinkertaistaa suunnittelijoiden työtä, koska suunnittelijan ei tarvitse miettiä eri päättytyyppien vaatimuksia ja rajoituksia.

Jos pääty valmistetaan levyaihiosta, on käytettävä Z35 taattua materiaalia standardin SFS-EN 10164:2005 mukaan, jolloin aihion valmistaja takaa murtokurouman arvoksi vähintään 35 %. Z35 taatun levyn käyttö poistaa lamellirepeilyn riskin. Merkintä Z35 tarkoittaa, että teräksen valmistaja takaa levyille 35 % vähimmäismurtokurouman paksuussuunnassa. Levyille vaaditaan lisäksi NDT-tarkastus hitsausviisteen kohdalta, minkä tarkoitus on edelleen varmistaa, ettei lamellirepeilyä esiinny. Z35 taatun materiaalin käyttöä ei päädyn tapauksessa tulisi korvata myöhemmillä NDT-tarkastuksilla. Z35 taatun materiaalin käyttämättömyyttä ei tulisi perustella pitkillä toimitusajoilla. Z35 taattuja levyjä joutuu tilaamaan erikseen ja toimitusaika on noin 3 viikkoa, joka on suhteellisen lyhyt aika muutenkin pitkäaikaisissa projekteissa (2017-05-05 Paineritelaskijoiden forum 2017).



Kuva 9. Standardin EN 12952-3:2012 mukainen e-tyyppin pääty hitsattuna putkeen.

Upotettavista päädyistä tekee huonomman vaihtoehdon verrattuna päittäishitsattavaan päättyyn sen suurempi hitsitilavuus sekä hitsinjuuren alueella sijaitseva rako vaipan seinämän ja päädyn välissä. Hitsin juuresta voi olla hankala saada tasalaatuinen, joka vaikuttaa lopputuotteessa väsymiskestävyyteen. Hitsatuissa rakenteissa on muutenkin aina pieniä alkusäröjä, jotka kasvavat jännitysvaihteluiden johdosta. Alkusäröjen ydintyminen johtaa säröjen kasvamiseen ja lopulta rakenteen murtumiseen. (Niemi 2003.) Kuvassa 10 esitetään standardin EN 12952-3:2012 mukainen d-tyyppin upotettava pääty. Ongelmakohtia havainnollistaa punainen ympyrä sekä viiva.



Kuva 10. Standardin EN 12952-3:2012 mukainen upotettava pääty.

Standardit SFS-EN 12952-3:2012 tai SFS-EN 13480-3:2017 eivät tunne koeponnistuspääty -käsittettä, mutta putkistostandardissa on maininta, että väliaikaisten rakenteiden tulee kestää nestepainekokeen aikaiset kuormitukset. Päätytyyppinä käytetään samaa päätyä kuten lopputuotteissa, mutta mitoittaminen tapahtuu painekokeen suunnitteluarvoilla. Päädyille halutaan riittävä varmuus, käyttäen samoja suunnittelujännityksen arvoja kuin lopputuotteille kuitenkin ottaen huomioon koeponnistuksen lämpötilan. Tulpattavalle osalle käytetään standardin SFS-EN 12952-3:2012 kohdan 6.3.7 suunnittelujännitystä koeolosuhteissa. Apuosa voidaan mitoittaa poikkeustapauksissa vaurioitumistodennäköisyydeltään yhtä heikoksi kuin testattava osa käyttäen kappaleessa 3.2 käsiteltyjä suunnittelujännityksiä. Tällaisissa tilanteissa on varauduttava testattavaa osaa vastaaviin turvallisuustoimenpiteisiin apuosankin osalta, koska vaurio voi yhtä suurella todennäköisyydellä tulla apuosaan kuin testattaviin komponentteihin.

Läpihitsatun liitoksen lujuutta ei yleensä lasketa, jos hitsausliitos ei ole virumisalueella. Hitsiaineen oletetaan olevan yhtä lujaa tai lujempaa kuin perusaine. Näin ollen läpihitsatun päittäishitsin mitoitussarvoksi valitaan liitettävistä osista heikoimman kestävyysmitoitussarvo. (SFS-EN 1993 1-8:2005, s. 48.) Hitsin suunnittelujännitys tulee ottaa huomioon mitoittaessa päätyä lopputuotteeseen. Lopputuotteessa käyttölämpötila voi olla niin korkea, että materiaalissa tapahtuu virumista. Virumisella tarkoitetaan venymien kasvamista korkeissa lämpötiloissa, vaikka jännitykset pysyisivätkin myötörajan alapuolella (Salmi & Pajunen 2010). Virumisalueella olevat hitsausliitokset huomioidaan standardin SFS-EN 12952-3:2012 kohdassa 6.3.6. Virumisominaisuudet lisäaineelle tunnettaessa suunnittelulujuutta vähennetään 20 %. Suunnittelulujuutta vähennetään edelleen 20 %, jos lisäaineen virumisominaisuuksia ei tunneta. (SFS-EN 12952-3:2012.)

Kattilalaitosten putkille asetetaan putkien sisä- ja ulkopuolelle kulumisvaroja, joilla otetaan huomioon eliniän aikainen materiaalin kulumisen. Standardin SFS-EN 12952-3:2012 mukaan putken sisäpuolinen kuluminen on vähäistä, jos syöttövesi on standardin SFS-EN 12952-12:2003 mukaista. Ulkopuolisilla pinnoilla kuluminen on vähäistä, elleivät pinnat ole kosketuksissa savukaasuihin. Kulumisvaroja ei oteta huomioon suunnitellessa koeponnistuspäättyä uuteen tuotteeseen. Paineekoe on niin lyhytaikainen, että sen vuoksi ei ole tarpeen lisätä kulumisvaroja. Käyttöiän aikaisissa koeponnistuksissa kulumisvarat otetaan tarvittaessa huomioon. Jos materiaalille on asetettu uutena kulumisvara, niin materiaalin elinaikana tapahtunut kuluminen arvioidaan ja otetaan huomioon laskettaessa tulpattavan osan ulko- sekä sisähalkaisijaa.

4.4 Päädyn mitoitus

Päädyn mitoittaminen perustuu sallittujen jännitysten menetelmään. Sallittujen jännitysten menetelmässä materiaalin myötölujuutta tai murtolujuutta pienennetään varmuuskertoimilla. Varmuuskertomella otetaan huomioon epävarmuustekijät kuten materiaalin kuluminen, valmistuksesta johtuvat epätarkkuudet tai ympäristöolosuhteet. (Salmi & Pajunen 2010.)

Standardin SFS-EN 12952-3:2012 mukaisen e-tyypin päädyn vaadittu seinämänpaksuus e_{ch} kevenysuran ulkopuolella lasketaan kaavalla:

$$e_{ch} = C_1 C_2 C_3 d_{ia,pi} \sqrt{\frac{p_c}{f_{allo,h}}}, \quad (30)$$

missä C_1	= muotokerroin tukemattomille päädylle
C_2	= muotokerroin suorakaiteen ja ellipsin muotoisille levyille
C_3	= muotokerroin aukollisille suorille levyille
$d_{ia,pi}$	= runkokappaleen sisähalkaisija ilman lisiä
p_c	= laskentapaine
$f_{allo,h}$	= päädyn suunnittelujännitys

Laskentapaineena p_c käytetään tulpattavan alueen määritettyä koepainetta. Pyöreille sekä aukottomille päädyille C_2 ja C_3 kertoimien arvo on 1. Kerroin C_1 voidaan katsoa kuvasta 11 tai laskea kaavalla:

$$C_1 = (-1,05725 - 1,60840x + 0,116245x^2 - 0,288657x^3) \frac{p_c}{f_{\text{allo.h}}} + 0,54 + 0,324245x^{-1} - 0,668534x^{-2} + 0,634377x^{-3}, \quad (31)$$

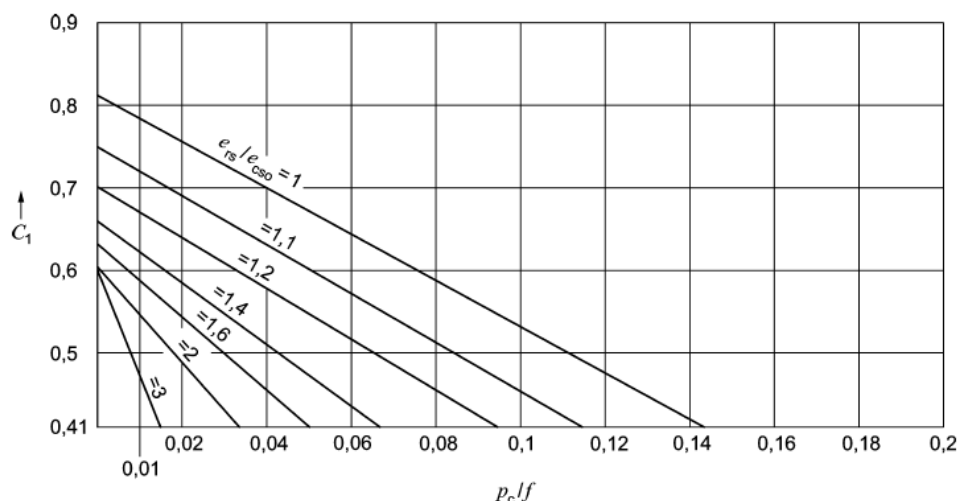
missä x on:

$$x = \frac{e_{rs}}{e_{cso}}, \quad (32)$$

missä e_{rs} = runkokappaleen todellinen seinämänpaksuus ilman kulumisvaroja

e_{cso} = runkokappaleen vaadittu seinämänpaksuus ilman kulumisvaroja

Kuitenkaan kerroin C_1 ei saa olla pienempi kuin 0,41.



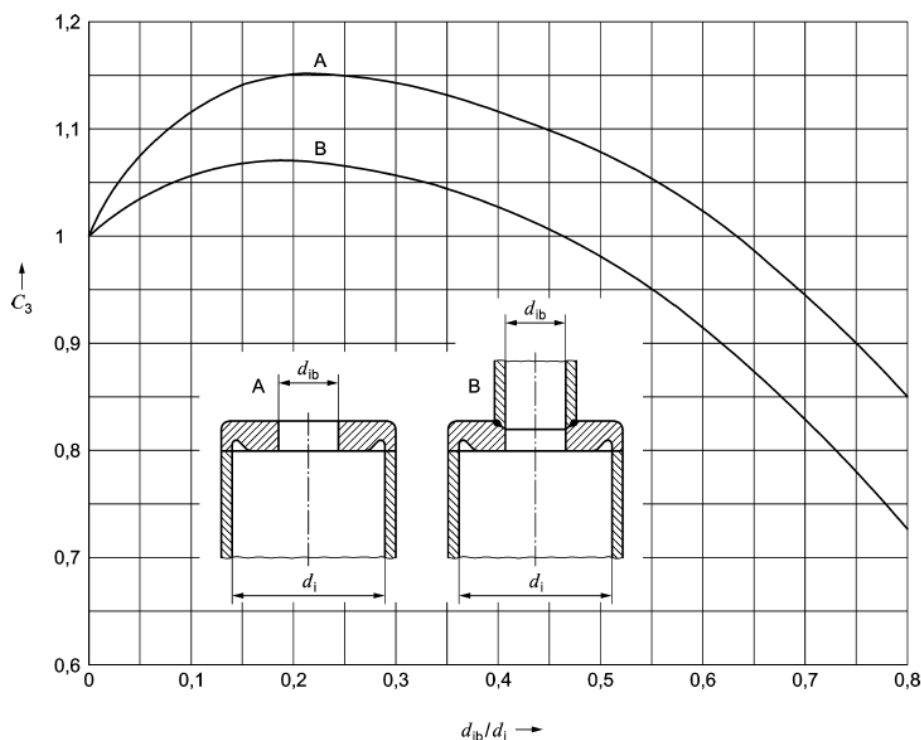
Kuva 11. Kerroin C_1 päädyille (SFS-EN 12952-3:2012, s. 130).

C_1 arvoa pienennettäisiin arvoon:

$$0,41 \sqrt{\frac{p_c}{f_{\text{allo.h}}}}, \quad (33)$$

jos päädyn suunnittelujännitystä pienennettäisiin perusainetta heikomman hitsauksen lisäaineen vuoksi. Pienentäminen tapahtuu ainoastaan virumisalueella oleville hitsausliitoksille. Suunnittelujännitystä pienennetään 20 %, jos tunnetaan ainoastaan lisäaineen virumislujuus. Suunnittelujännitystä pienennetään edelleen 20 %, jos lisäaineen eikä hitsausliitoksen virumisominaisuuksia tunneta. (SFS-EN 12952-3:2012.) Koeponnistus suoritetaan 20 °C lämpötilassa, jolloin virumista ei tapahdu. Eli C_1 kertoimen pienin mahdollinen arvo on 0,41. Virumista käsiteltiin kohdassa 4.3.

Koeponnistuspäätyjen osalta on syytä varautua päätyyn hitsattavaan yhteeseen. Yhde voi tulla tarpeen, jos tarvitaan paikka ilmausventtiilille tai paineenkorotusletkulle. Yhde vaikuttaa päädyn vaadittun paksuuden kaavoissa C_3 kertoimen arvoon. C_3 kerroin tulee standardista SFS-EN 12952-3:2012 kohdasta 10.3.3. Kuvassa 12 on annettu kaksi käyrää, A ja B. Käyrän A arvoja käytetään silloin, kun päätyyn tulee vain reikä. Käyrän B arvoja käytetään silloin, kun päätyyn tulee hitsattava yhde.



Kuva 12. Kerroin C_3 (SFS-EN 12952-3:2012).

Kuvan 12 käyrän A arvot lasketaan kaavalla:

$$C_3 = 1 + 1,98x - 9,02x^2 + 18,53x^3 - 19,31x^4 + 7,54x^5, \quad (34)$$

missä x lasketaan kaavalla:

$$x = \frac{d_{ib}}{d_i}, \quad (35)$$

missä d_{ib} = yhteen tai reiän sisähalkaisija
 d_i = runkokappaleen sisähalkaisija.

Yhteen tai reiän ja runkokappaleen sisähalkaisijan suhde d_{ib}/d_i ei saa olla suurempi kuin 0,8 eikä myöskään aukko saa koskettaa päädyn hitsiä milteenkään kohdalta.

Kuvan 12 käyrän B arvot lasketaan kaavalla:

$$C_3 = 1 + 0,944x - 4,31x^2 + 8,39x^3 - 9,21x^4 + 3,69x^5. \quad (36)$$

Päädyn kevennysuran pohjalla oleva seinämänpaksuus e_{ch1} lasketaan kaavalla:

$$e_{ch1} \geq \frac{1,3p_c \left(\frac{d_{ia,pi}}{2} - r_{ik} \right)}{f_{allo,h}}, \quad (37)$$

missä r_{ik} on kevennysuran säde. Seinämänpaksuudelle uran kohdalla on asetettu myös ehto:

$$e_{ch1} \geq e_{rs} \quad (38)$$

Ehdon mukaan päädyn tulee olla ohuimmalta kohdaltaan sama tai vähintään runkokappaleen seinämänpaksuuden verran.

Kevennysuran säteen tulee täyttää ehto:

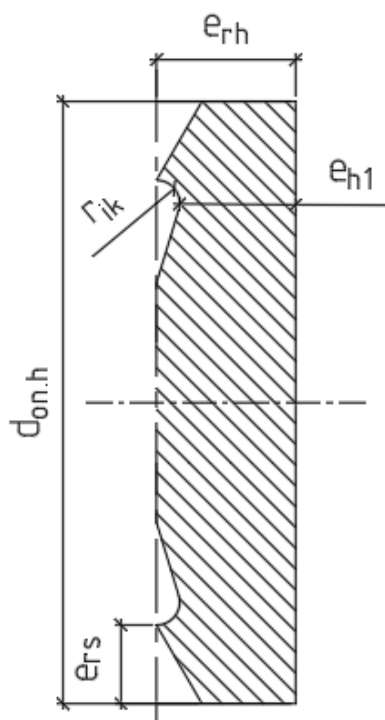
$$r_{ik} \geq 0,5e_{rh} \quad (39)$$

sekä:

$$r_{ik} \geq 5 \text{ mm}, \quad (40)$$

missä e_{rh} on suoran päädyn todellinen seinämänpaksuus ilman lisiä. (SFS-EN 12952-3:2012.)

Päädyn ulkohalkaisija $d_{on,h}$ määräytyy tulpattavan osan mukaan. Päädyn paksuus liittyvältä osalta määräytyy myös runkokappaleen todellisen seinämänpaksuuden e_s mukaan. Kuvassa 13 on havainnollistettu runkokappaleen mukaan määräytyvä päädyn mitta sekä kevennysuran paksuus e_{h1} , kevennysuran säde r_{ik} ja päädyn todellinen paksuus ilman lisiä e_{th} . Periaatteessa koeponnistuspääty olisi seinämänpaksuuden e_s osalta testattavaa osuutta, koska mitta ei ole päädyn suunnittelijan vapaasti valittavissa. Tämän seinämänpaksuuden osuus päädyssä on niin lyhyt, että sitä ei ole tarpeen lähteä erittelemään laskentaan.



Kuva 13. Pääty ilman yhdettä tai reikää.

4.5 Runkokappaleen vaadittu seinämänpaksuus

Kattilastandardin suoran putken mitoituskaavat perustuvat kappaleessa 3.4 suurimman sallitun koe-paineen kaavan yhteydessä käsiteltyyn TRESCAN myötöehtoon. Näillä kaavoilla voidaan laskea paineen sekä lämpötilan edellyttämä vaadittu seinämänpaksuus. Lämpötila otetaan huomioon valitta-essa suunnittelujännitystä. Tässä työssä käytetty suoran putken vaaditun seinämän e_{cs} kaava ei ota huomioon mahdollisen reikäkentän heikentämää aluetta eli kyseessä on suoran putken mitoitus-kaava. Kaava, jolla huomioidaan reikäkentän heikentämä alue, ei ole tarpeen käsitellä suoran pää-dyn mitoituksen yhteydessä.

Koeponnistuspäädyn vaaditun paksuuden kaavan kerrointa G_1 varten tarvitaan lujuuskertoimella 1 laskettua putken vaadittua seinämänpaksuutta. Runkokappaleen vaaditun seinämänpaksuuden las-kentaan löytyy kaavat, jos tunnetaan ulko- tai sisäpuolinenhalkaisija. Tässä työssä käytetään kaa-vaa, kun tunnetaan runkokappaleen nimellinen ulkohalkaisija $d_{on,pi}$. Painelaitelaskuissa käytetään lisättömiä mittoja eli nimellisestä ulkohalkaisijasta $d_{on,pi}$ vähennetään ulkopuoliset kulumisvarat ja saadaan runkokappaleen lisätön ulkohalkaisija $d_{oa,pi}$. Näin ollen vaadittu seinämänpaksuus e_{cs} lasken-taan kaavalla (SFS-EN 12952-3:2012):

$$e_{cs} = \frac{p_c \cdot d_{oa,pi}}{(2f_{test} - p_c)v + 2p_c}, \quad (41)$$

missä $d_{oa,pi}$ = runkokappaleen ulkohalkaisija ilman lisiä

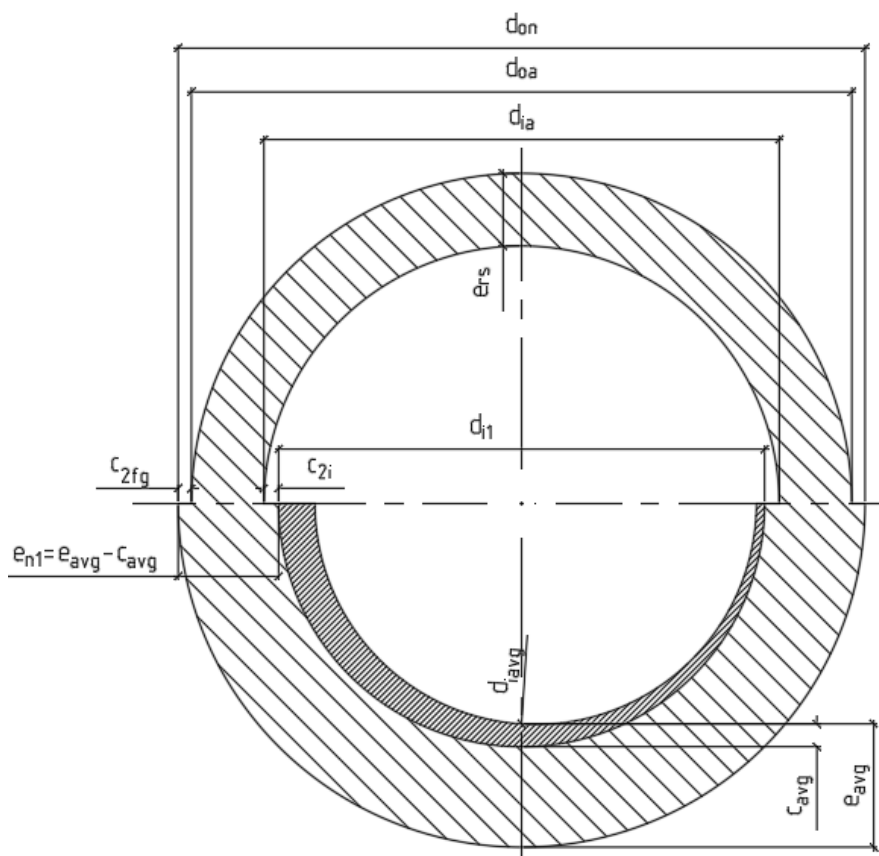
f_{test} = suunnittelujännitys koeolosuhteissa

v = lujuuskerroin

Laskentapaineena p_c käytetään koeponnistettavalle alueelle määritettyä koepainetta. Painelaitelaskuissa laskentahalkaisijana käytetään mittoja, joista on vähennetty kaikki lisät. Eli kulumisvarat ja muut mahdolliset lisät vähennetään ulko- sekä sisähalkaisijasta. Laskentahalkaisijaa määrittäessä otetaan huomioon, onko tuote tilattu minimiseinämällä e_{n1} vai keskimääräisellä seinämänpaksuudella e_{avg} . Keskimääräinen seinämä sisältää putkituotteen valmistuksesta johtuvan alitoleranssin c_{avg} . Standardi SFS-EN ISO 1127:1997 sisältää viisi erilaista toleranssiluokkaa seinämänpaksuudelle, jotka on esitetty taulukossa 5. Putken sisäpuolinen epäpyöreys voi johtua putken valmistusprosessista, terästyypistä tai lämpökäsittelystä (SFS-EN ISO 1127 1997). Sisäpuolista laskentahalkaisijaa d_a laskettaessa keskimääräisestä sisähalkaisijasta d_{avg} tulee vähentää pois toleranssipaksuus c_{avg} sekä sisäpuolinen kulumisvara c_{2i} . Ulkopuolista laskentahalkaisijaa d_{oa} laskettaessa nimellisestä ulkohalkaisijasta d_{on} vähennetään ulkopuolinen kulumisvara c_{2fg} . Kuvassa 14 havainnollistettu eri liisien ja halkaisijoiden muodostuminen sylinterimäisessä kappaleessa.

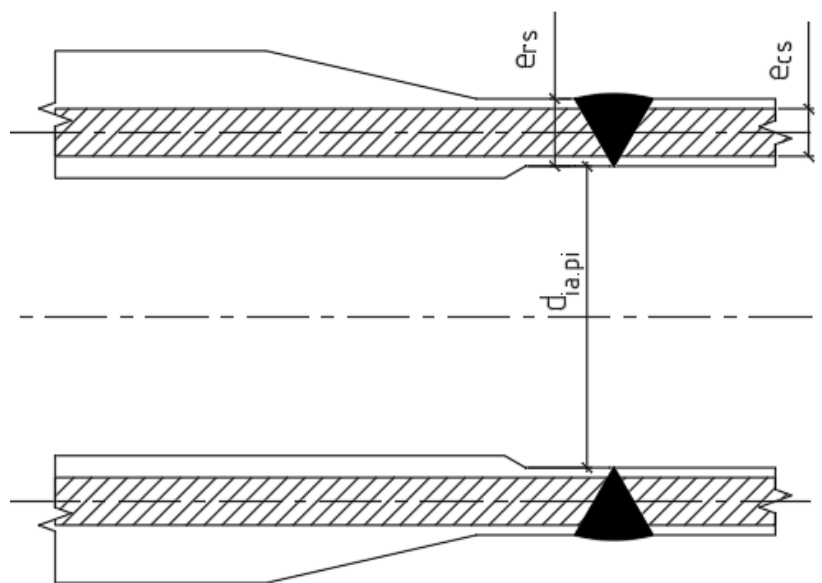
Taulukko 5. Paksuuden toleranssit (SFS-EN ISO 1127:1997).

Toleranssiluokka	Paksuuden toleranssi
T ₁	± 15 %, min. ± 0,6 mm
T ₂	± 12,5 %, min. ± 0,4 mm
T ₃	± 10 %, min. ± 0,2 mm
T ₄	± 7,5 %, min. ± 0,15 mm
T ₅	± 5 %, min. ± 0,1 mm



Kuva 14. Putken poikkileikkauksen symbolit.

Jos koeponnistuspääty mitoitetaan putken päähän, josta lähtee koeponnistuksen jälkeen erikokoinen putki, niin liitosalueen mitat tulevat määräävien halkaisijoiden mukaan. Liitosalue koneistetaan niin, että sisähalkaisijat ovat saman kokoiset. Normaalisti jos pääty mitoitetaan suoraan putkeen ilman kuvassa 15 näkyvää viistettyä aluetta, niin liitosta varten putken päästä koneistetaan alitoleranssin c_{avg} verran pois. Pyöreä putken sisäpuoli varmistaa tasalaatuisen hitsin juuren. Kuvan 15 tilanteessa ei riitä alitoleranssin koneistaminen vaan joudutaan koneistamaan enemmän. Liitosalueen todellinen seinämänpaksuus e_s muodostuu lähtevän putken ulkohalkaisijan d_{on} sekä suurimman lisättömän sisähalkaisijan d_{ia} erotuksesta. Viistettyyn alueeseen ei ole tarvetta syventyä enempää lujuusteknisesti, kuin kuvassa 15 on esitetty. Ainoana vaatimuksena pidetään vaaditun seinämän e_s löytymistä viisteen jälkeiseltä suoralta osuudelta, joka on havainnollistettu kuvassa 15 viivoitetulla alueella.

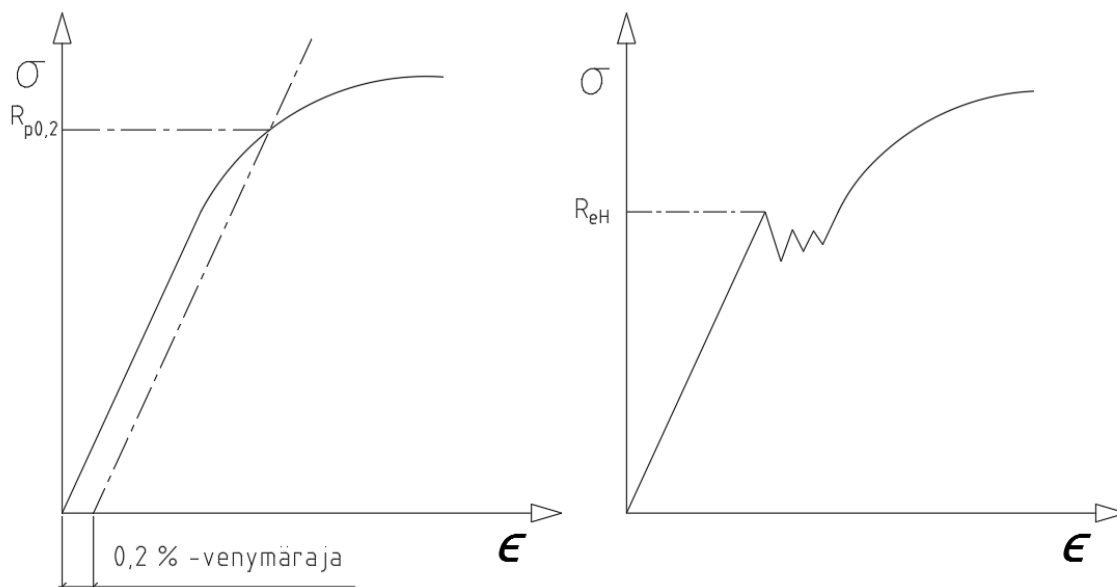


Kuva 15. Minimiseinämän esitys.

4.7 Suunnittelujännitys apuosille

Apuosien mitoitukseen käytetään samoja varmuuskertoimia kuin lopputuotteelle. Apuosan suunnittelujännitys f_{allo} määräytyy sen mukaan, käytetäänkö ferriittisiä vai austeniittisiä teräksiä. Austeniittisten terästen osalta variaatioita lisää paksuussuuntainen vähimmäismurtokurouman arvo. Tässä työssä käydään suunnittelujännityksen määrittäminen ferriittisten sekä austeniittisten terästen osalta. Apuosan suunnittelujännitystä valittaessa otetaan huomioon koeolosuhteet, jolloin materiaalien lujuusarvot määräytyvät koelämpötilan mukaan. Paineekoe suoritetaan huonelämpötilassa (20 °C) eli virumismurtolujuutta ei tarvitse ottaa huomioon suunnittelujännitystä laskettaessa. Käytännössä lämpötila alkaa vaikuttamaan materiaalin lujuusominaisuuksiin vasta 50 °C lämpötilassa. Esimerkiksi standardi SFS-EN 10028-2:2017 antaa kuumalujille seostamattomille ja seostetuille teräksille pienempiä 0,2 % venymärajan arvoja 50 °C lämpötilasta ylöspäin.

Yleisesti myötörajan arvona käytetään ylemmän myötörajan R_{eH} arvoa. Yleisesti rakenneteräksillä saadaan vetokokeen tuloksena selvä myötörajan arvo, joka on esitetty kuvassa 17. Kuumalujilla kuitenkin austeniittisilla teräksillä ei ole yhtä selvää myötörajan arvoa vaan käytetään 0,2-rajaa myötörajan arvona. 0,2-rajalla tarkoitetaan sitä jännityksen arvoa, jolla saavutetaan pysyvä 0,2 % venymä. Kuvassa 17 on esitetty 0,2-raja jännitys-venymäpiirroksen avulla. 0,2-rajan lisäksi on 1,0-raja eli $R_{p1,0}$, jolla tarkoitetaan vastaavasti sitä jännityksen arvoa millä saavutetaan 1,0 % pysyvä venymä. (Lepola & Ylikangas 2016.)



Kuva 17. 0,2 % venymäraja ja myötöraja R_{eH} .

Ferriittisille teräksille suunnittelujännitys f_{allo} valitaan pienin arvo kaavasta (SFS-EN 12952-3:2012.):

$$f_{\text{allo}} = \min \left\{ \frac{R_{m\ 20}}{2,4}; \frac{R_{eH\ 20}}{1,5}; \frac{R_{p0,2\ t}}{1,5} \right\}, \quad (43)$$

missä R_{m20} = materiaalin murtolujuus lämpötilassa 20 °C

$R_{eH\ 20}$ = ylempi myötöraja lämpötilassa 20 °C

$R_{p0,2\ t}$ = 0,2 % venymäraja lämpötilassa t

Austeniittisia teräksiä käytettäessä vähimmäismurtovenymän poikittaissuunnassa ollessa < 30 % suunnittelujännitys f_{allo} lasketaan (SFS-EN 12952-3:2012.):

$$f_{\text{allo}} = \frac{R_{p0,2\ t}}{1,5}. \quad (44)$$

Jos käytetään austeniittisia teräksiä, joiden vähimmäismurtovenymä poikittaissuunnassa on ≥ 30 % mutta < 35 %, lasketaan suunnittelujännitys f_{allo} seuraavalla tavalla (SFS-EN 12952-3:2012.):

$$f_{\text{allo}} = \frac{R_{p1,0\ t}}{1,5}, \quad (45)$$

missä $R_{p1,0\ t}$ on valitun materiaalin 1,0 % venymäraja lämpötilassa t .

Käytettäessä austeniittisia teräksiä, joiden vähimmäismurtovenymä on poikittaissuunnassa ≥ 35 %, valitaan suunnittelujännitykseksi f_{allo} pienin arvo kaavasta (SFS-EN 12952-3:2012.):

$$f_{\text{allo}} = \min \left\{ \frac{R_{m\ 20}}{3}; \frac{R_{p1,0\ t}}{1,2} \right\}, \quad (46)$$

missä $R_{m\ 20}$ on materiaalin murtolujuus lämpötilassa t .

Mitoittaessa apuosia ASME-materiaaleille, käytetään Maximum Allowable Working Stress eli MAWS-arvoja. ASME-materiaalien suunnittelujännitykset ovat saatavilla ASME-materiaalistandardeista.

5 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Eurooppalaisissa painelaitteiden tuotestandeissa koepaineiden kaavat eroavat hieman toisistaan ja näitä eroja ei ole avattu standardeissa. Työssä käytiin läpi putkistostandardin SFS-EN 13480-5:2017 ja kattilastandardin SFS-EN 12952-3:2012 kaavojen eroja. Säiliöstandardissa SFS-EN 13450-5:2014 olisi ollut vielä hieman eri lailla, mutta sitä ei työssä käsitelty. Säiliöstandardissa koepaineen laskentaan vaikutti testausryhmät, johon taas vaikuttaa käytetty materiaali. Painelaitedirektiivissä ei puhuta mitään vaaditun koepaineen yhteydessä materiaalien testausryhmistä, vaan ainoastaan vaaditun koepaineen tulisi vastata mahdollisimman paljon käytönaikaisia kuormia. Voi olla, että testausryhmien avulla voidaan jotenkin tarkemmin laskea koepaineet eri materiaaleille. Jotta standardeissa esiintyviä koepaineen laskentatavoissa olevia eroja saataisiin selvitettyä tarkemmin, tulisi ottaa yhteyttä standardin kirjoittajaan. Tällaisen yhteistyön avulla päästäisiin perille laskentakaavojen eroavaisuuksista.

Koeponnistuspaineet esitetään komponenttien mukaisilla dokumenteilla. Haastattelujen aikana nousi esiin toive, että koepaineiden toivottaisiin olevan helpommin asennussuunnittelijoiden saatavilla. Puutteita ja parannettavaa koepaineiden esittämisessä löytyi venttiilien sekä laitteiden osalta. Venttiilien ja laitteiden toimittajien tulisi toimittaa suurimmat sallitut koepaineet niille kuuluville dokumenteille, jotta asennussuunnittelijoiden työkuorma helpottuisi. Putkien ja päätyjen koeponnistuspaineet ovat eri dokumenteilla. Dokumenttien hallinnointi kuuluu eri osastoille. Näin ollen yhden dokumentin ylläpitäminen yhteistyössä muiden osastojen kanssa olisi haasteellista. Päätyjen suunnittelutiedot ovat myös omassa dokumentissaan. Päädyille tulee laskea myös koepaineet eikä niitä ole mahdollista tai järkeä lähteä laittamaan samalle dokumentille putkien kanssa.

Asennussuunnittelija määrittää koepaineen koeponnistettaville alueille, joka sisältää suuren määrän erilaisia putkia, päätyjä, yhteitä, venttiileitä sekä laitteita. Työn aikanana pohdittiin myös mahdollista työkalua koepaineen valitsemiseen. Koepaineen valitsemiseen oleva työkalu on hankalasti toteutavissa, koska komponentit sijaitsevat eri dokumenteilla. Työkalu voisi olla toteutettavussa, jos komponentit olisivat varmasti samassa järjestelmässä ja jokaisella komponentilla olisi oma koodinsa. Komponenttikohtaisen koodin avulla järjestelmästä voisi hakea saatavilla olevat koepaineet työkaluun, joka sitten valitsee koepaineen kappaleessa 3.6 käsitellyllä tavalla. Komponenttien koodien syöttäminen järjestelmään voisi olla sen verran hidasta, että samassa ajassa koepaineen valitsee manuaalisesti eri listoilta. Kuten aiemminkin on tehty. Toinen vaihtoehto voisi olla, että koeponnistusalueen voisi valita 3D-mallista. 3D-mallista olisi helppo valita alue ja ei tarvitsisi kirjoittaa jokaisen komponentin koodia. Jotta tämä vaihtoehto olisi toteutettavissa, tulisi mallin sisältää jokainen komponentti.

Apuosien mitoittamisessa oli mielenkiintoisia haasteita, jotta standardin kaavat saatiin toimimaan halutulla tavalla. Jotta kaavat toimisivat halutulla tavalla, tulee testattaville osille käyttää kappaleessa 3.2 käsiteltyjä suunnittelujännityksiä koeolosuhteille. Näitä suunnittelujännityksen arvoja ei tulisi käyttää koeponnistuksen apuosille, koska apuosat mitoitetaan sitten yhtä heikoksi muiden osien kanssa. Opinnäytetyön aikana syntyi työkalu koeponnistuspäätyjen ja yhteiden mitoittamiseen,

joka auttoi sisäistämään apuosien mitoittamisen haasteet. Erillisen työkalun tekeminen koeponnistuspäätysten ja niihin hitsattavien yhteiden laskentaan oli välttämätöntä, koska lopputuotteen mitoitustyökalut eivät taipuneet ilman valtavaa määrää muutoksien tekemistä.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoite oli selkeyttää koeponnistuspaineiden määrittämistä puhtaasti EN- sekä ASME-standardin mukaan suunnitelluissa vesiputkikattiloissa. Tavoitteena oli myös selvittää tilannetta, kun vesiputkikattilan tulee täyttää painelaitedirektiivin vaatimukset, mutta suunnitteluun käytetään muuten ASME-standardeja. Koeponnistuksissa käytettävien apuosien mitoitus haluttiin myös selkeyttää.

Puhtaissa EN-standardin mukaisesti suunniteltavissa vesiputkikattiloissa tulisi noudattaa tuotestandardia painelaitedirektiivin täydentämiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että koepaineet tulisi laskea tuotestandardin mukaisesti, jos komponentti muuten on suunniteltu sen mukaan. Pääasiassa vesiputkikattiloiden suunnitteluun puhtaissa EN-standardin tapauksissa käytetään vesiputkikattilastandardia SFS-EN 12952 sekä metallisten teollisuusputkistojen standardia SFS-EN 13480. Näiden kahden standardien nestepainekokeen vaaditun koepaineen kaavoja vertailtiin keskenään. Kaavoissa havaittujen eroavaisuuksien vuoksi halutaan käyttää ainoastaan kattilastandardin SFS-EN 12952-3:2012 mukaista nestepainekokeen vaaditun koepaineen kaavaa myös putkistostandardin SFS-EN 13480:2017 mukaisesti suunnitelluille kappaleille.

ASME-standardin mukaisesti suunniteltavissa voimalaitoskattiloissa noudatetaan tuotestandardin mukaisia koepaineen kaavoja. Nestepainekokeen vaaditun koepaineen laskenta on samanlainen molemmissa yrityksen kannalta tärkeimmissä ASME Section 1:2017 ja ASME B31.1:2016 standardeissa. Työssä saatiin selveyttä tilanteeseen, kun voimalaitoskattilan suunnitteluun sovelletaan EN- sekä ASME-standardeja. Ratkaisevana tekijänä on CE-merkintävaatimus. Jos voimalaitoskattila toimitetaan CE-merkittynä, joudutaan täyttämään painelaitedirektiivin vaatimukset. Tämän vuoksi koepaineen laskentaan käytetään EN-standardien laskentakaavoja.

Kaasupainekoe ei ole kovin yleinen ja sitä käytetään silloin, kun nestepainekoe ei ole mahdollinen. Kaasupainekokeen koepaineen arvona halutaan käyttää kaavan 17 mukaista arvoa PED-kattiloissa. Koska käytetään pienempää koepaineen arvoa, tulee standardissa SFS-EN 13480-5:2017 esitettyjä laajempia NDT-tarkastuslaajuuksia noudattaa. ASME-standardin B31.1:2016 mukaisessa kaasupainekokeessa on myös vaade, että jokainen liitos tulisi tarkista rikkomattomilla aineenkoetusmenetelmillä.

ASME- sekä EN-standardit vaativat laskemaan komponenttikohtaisen suurimman sallitun koeponnistuspaineen. Suurimmalle sallitulle koepaineelle ei ole standardeissa esitetty kaavaa. Ainoastaan jännitykset, mitä ei tule ylittää painekokeen aikana. Työssä käsiteltiin perusteita johdetulle kaavalle suurimman koepaineen laskentaa varten.

Apuosien mitoitukseen saatiin selvyttä ja syitä, minkä takia tulisi käyttää ainoastaan SFS-EN 12952-3:2012 mukaista päätytyyppiä. Koeponnistuksen apuosat tulisi mitoittaa kestävänsä koeponnistus. Koeponnistuspäätysten mitoittamisessa tulee huomioida, että käytetään oikeita suunnittelujännityksen arvoja, joita on käsitelty kappaleessa 4.7. Runkokappaleelle tulee käyttää kohdassa 3.2 käsiteltyjä suunnittelujännityksiä koeolosuhteita varten. Koeolosuhteiden suunnittelujännityksissä löytyi eroa säiliöstandardin SFS-EN 13445-3:2014 ja SFS-EN 13480-3:2017 välillä, kun käytetään austeniittisiä teräksiä vähimmäismurtovenymän ollessa $\geq 35\%$. Eroa oli 5 %-yksikköä sallitussa murtolujuuden arvossa. Putkistostandardi on tuotestandardina lähempänä yrityksen suunnittelemaa tuotteita. Näin ollen koeolosuhteiden suunnittelujännityksen arvoina voisi käyttää austeniittisillä teräksillä murtovenymän ollessa $\geq 35\%$ SFS-EN 13480-3:2017 mukaisia arvoja.

Mitoittaessa koeponnistuspäätystä uuden voimalaitoskattilan koeponnistuksiin, kulumisvaroja ei tule huomioida. Kulumisvaroja ei tule myöskään huomioida koeponnistuspäätystä laskettaessa. Ei runkokappaleella, päädyllä tai yhteellä. Kulumista ei ehdi tapahtua, koska koeponnistus on lyhytaikainen tapahtuma.

Työssä käsiteltiin myös koeponnistuspäätynä käytettävän päätytyypin standardin vaatimuksia. Suoralle levypäädylle tulee käyttää Z35 taattua levyaihiota sekä hitsausviisteen kohdalle tulee tehdä NDT-tarkastus. Näillä toimenpiteillä poistetaan lamellirepeilyn riski. Molemmat vaatimukset tulisi täyttää eikä yrittää korvata esimerkiksi Z35 taatun materiaalin käyttöä myöhemmillä NDT-tarkastuksilla.

Jokaisen koeponnistuskokonaisuuden venttiilin ja laitteen suurin sallittu koeponnistuspaine tulisi tarkistaa, eikä olettaa niiden kestävän automaattisesti koepainetta. Haastatteluissa selvisi, että esimerkiksi lieriön koeponnistuspaine on tullut joissain tapauksissa määrääväksi komponentiksi.

7 LÄHTEET

- 2015-06-23 Painelaitelaskijoiden forum. (23. June 2015). Painelaitelaskijoiden forum.
- 2017-05-05 Painelaitelaskijoiden forum. (5. May 2017). Painelaitelaskijoiden forum.
- ASME B31.1. (2016). Power Piping. ASME Code for Pressure Piping, B31. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME Code Cases. (2017). ASME Boiler and Pressure Vessel Code.
- ASME Section VIII. (2017). Division 2 alternative rules. ASME Code for boiler and pressure vessel code. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASTM A770/A770M. (2003). Standard Specification for Through-Thickness Tension Testing of Steel Plates for Special Applications. Philadelphia: ASTM - ASTM International.
- Fire tube boiler with 2 gas burners. (20. February 2012). NV/SA; Thermic Engineering. Noudettu osoitteesta http://boilers.thermicengineering.be/products-serv/steam-gen/fire_tube_boiler_two_burners/
- Heikkilä, E.;& Huhdankoski, E. (1999). Rautaruukin paineastiakäsikirja. Keuruu: Otava.
- Heinonkoski, S. (2017). Luokan 1 kemikaaliputkiston rakentaminen vaatimusten mukaisesti. Tampereen ammattikorkeakoulu. Noudettu osoitteesta https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/136270/Heinonkoski_Santeri.pdf?sequence=1
- JSM 2012-11-29 Boiler Code EN 12952-3. (2012). Varkaus.
- Järvinen, T. (2016). Teollinen taonta valmistusmenetelmänä. Tampere: Eräsalon Kirjapaino Oy .
- Kortelainen, J. (1-4. May 2018). Koeponnistusasioiden haastattelu.
- Kortelainen, J. (27. April 2018). Sähköposti PED/EN ASME sekoitus.
- Lepola, P.;& Ylikangas, R. (2016). Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Niemi, E. (2003). Levyrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Teknologiateollisuus ry.
- Ongelin, P.;& Valkonen, I. (2016). SSAB Domex Tube Rakenneputket. Hämeenlinna: SSAB Europe Oy.
- Painelaitedirektiivi 2014/68/EU. (2014). Euroopan unionin virallinen lehti. L 189/164. Noudettu osoitteesta <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=fi>
- Putkinen, S. (2014). Vesiputkikattilan paineenalaisten osien lujuuslaskentaohjelman kehitys. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, LUT Metalli. Noudettu osoitteesta https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/98680/Diplomity%C3%B6_Saila_Putkinen.pdf?sequence=2
- Rautaruukki Oyj. (2007). Hot rolled Steel Plates, Sheets and Coils.
- Salmi, T.;& Pajunen, S. (2010). Lujuusoppi. Tampere: Presseus Oy.
- SFS 2373. (1980). Hitsaus. Staattisesti kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. Metalliteollisuuden Standardisoimiskeskus TES.
- SFS-EN 10028-2 . (2017). Painelaiteräokset. Levytuotteet. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräokset. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry.
- SFS-EN 10164. (2005). Terästuotteet parannetuin paksuussuuntaisin murtokuroumaominaisuuksin. Tekniset toimitusehdot. Teknologiateollisuus ry, Standardisointi.
- SFS-EN 12952-3. (2012). Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 3: Paineenalaisten osien suunnittelu ja laskenta. Helsinki: Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry.
- SFS-EN 12952-6. (2011). Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 6: Kattilan paineenalaisten osien valmistuksen aikainen tarkastus, dokumentointi ja merkintä. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry.

- SFS-EN 12953-3. (2016). Tulitorvikattilat. Osa 2: Paineenalaisten osien suunnittelu ja laskenta. Helsinki: Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry.
- SFS-EN 13445-3. (2014). Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 5: Tarkastus ja testaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry.
- SFS-EN 13445-5 . (2014). Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 5: Tarkastus ja testaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Standardisoimis yhdistys ry.
- SFS-EN 13480-2. (2017). Metalliset teollisuusputkistot. Osa 2: Materiaalit. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry.
- SFS-EN 13480-3. (2017). Metallic industrial piping. Part 3: design and calculations. Helsinki: Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry.
- SFS-EN 13480-5. (2017). Metalliset teollisuusputkistot. Osa 5: Tarkastus ja testaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Standardisoimis yhdistys ry.
- SFS-EN 1993 1-8. (2005). Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu. Teoknologia teollisuus, Standardisointi.
- SFS-EN ISO 1127. (1997). Stainless steel tubes. Dimensions, tolerances and conventional masses per unit length. Helsinki: Metalliteollisuuden Standardisoimiskeskus.
- SIGNS. (2009). Steel industry guidance notes: Trough-thickness Properties. SN34 04/2009.
- Sumitomo SHI FW. (2017). Company Factsheet: A New Global Leader In Sustainable Energy Solutions. Noudettu osoitteesta <http://www.shi-fw.com/wp-content/uploads/2017/06/Company-Factsheet-Sumitomo-SHI-FW-Brochure.pdf>
- Tekniikan kaavasto. (2013). Tampere: Tammertekniikka.
- The Welding institute. (2000). Noudettu osoitteesta <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-lamellar-tearing-047/>
- Turvallisuus ja kemikaalivirasto. (2016). Noudettu osoitteesta <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Tarkastuslaitokset/>
- Valtioneuvoston asetus painelaiteturvallisuudesta. L 1549/2016. (21. May 2018). Finlex. Lainsäädäntö. Noudettu osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161549#Lidp450734912>